Abhandlungen

zur

Physiologie der Gesichtsempfindungen

aus dem

physiologischen Institut zu Freiburg i. B.

Herausgegeben

von

J. von Kries.

Drittes Heft.

Mit Figuren im Text.



Leipzig.

Verlag von Johann Ambrosius Barth.

1908.

Die innere Paginierung bezieht sich auf die *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane,* herausgegeben von Ebbinghaus und Nagel.

Inhalt.

Über die Wahrnehmung des Flimmerns durch normale und durch total farbenblinde Personen.

Von

J. v. Kries.

Die Beobachtungen von Schaternikoff[1] haben es wahrscheinlich gemacht, dafs die Stäbchen resp. der mit ihnen als Endorganen ausgerüstete Bestandteil des Sehorgans eine geringere Empfindlichkeit für schnelle periodische Wechsel des einwirkenden Lichtes besitzen als der trichromatische Bestandteil; es konnte dies daran ersehen werden, dafs rotierende Scheiben, um völlig gleichmäfsig zu erscheinen und nicht mehr zu flimmern, schneller laufen müssen, wenn man mit gut helladaptiertem Auge, als wenn man mit dunkeladaptiertem Auge beobachtet. Im Hinblick auf die bekannte, neuerdings so viel diskutierte Theorie der totalen Farbenblindheit war hierdurch die Frage nahegelegt, wie sich die mit dieser Anomalie behafteten Personen in Bezug auf die Erscheinungen des Flimmerns rotierender Scheiben verhalten möchten, insbesondere ob für sie bei der gleichen oder schon bei einer geringeren Umdrehungsfrequenz das Flimmern aufhört. Soviel mir bekannt, sind Angaben hierüber in der Literatur nicht vorhanden. Da mir zur Zeit kein Fall der genannten Art zur Verfügung stand, so bat ich Herrn Kollegen Uhthoff, bei sich bietender Gelegenheit dieser Frage seine Aufmerksamkeit zuzuwenden.

Herr Kollege Uhthoff ist dieser Aufforderung mit sehr dankenswerter Bereitwilligkeit nachgekommen und hat mir über seine Beobachtungen die nachstehenden Mitteilungen gemacht, die ich mit seiner freundlichst erteilten Zustimmung hier bekannt gebe.

---

[1] *Zeitschr. f. Psychol.* 29, S. 241.

„Versuch mit Episkotister vor weifsem Schirm; in dem Episkotister vier gleich grofse Ausschnitte (sektorförmig); bei einer Umdrehung des Antriebrades gibt es beim Fixieren einer bestimmten Stelle einen 22 maligen Wechsel von Hell und Dunkel. Nach dem Metronom gemessen verschwindet für den total Farbenblinden die Erscheinung des Flimmerns bei etwa 60—72 Drehungen des Antriebrades pro Minute, also einem 22—26 maligen Wechsel von Hell und Dunkel pro Sekunde. Für unsere normalen Augen (mehrere Beobachter) verschwindet das Phänomen des Flimmerns bei ca. 180 Umdrehungen in einer Minute, also ca. einer Umdrehung in $^1/_3$ Sekunde. Das normale Auge braucht also eine viel schnellere Rotationsgeschwindigkeit (ca. dreimal schneller) des Episkotisters, um das Flimmern zum Verschwinden zu bringen, als das total farbenblinde.

Bei erheblicher Herabsetzung der objektiven Beleuchtung ändert sich für den total Farbenblinden in diesem Verhältnis nichts Wesentliches, während für das normale Auge bei der gleichen Herabsetzung der objektiven Beleuchtung die Umdrehungsgeschwindigkeit erheblich vermindert werden mufs. Bei einer Beleuchtung, wo meine Sehschärfe nur ca. $^1/_2$ der normalen beträgt (also ca. eine Meterkerze) braucht auch das normale Auge eine einmalige Umdrehung des Antriebrades in der Sekunde, mit 22 maligem Wechsel von Hell und Dunkel, ähnlich wie das total farbenblinde Auge. Es ergibt sich also in Bezug auf das Aufhören der Flimmererscheinung eine erhebliche Differenz zwischen dem normalen und dem total farbenblinden Auge.“

Ferner schrieb mir Hr. U. in zwei weiteren Mitteilungen, dafs er noch eine Anzahl anderer mit angeborener totaler Farbenblindheit behafteter Personen in der gleichen Richtung untersucht und ganz den gleichen Befund erhalten habe.

Die Beobachtung ergibt also, in voller Bestätigung dessen, was nach der Theorie vermutet werden konnte, dafs im vollen Tageslicht die Erscheinung des Flimmerns für den total Farbenblinden bei einem Lichtwechsel von einigen zwanzig Malen pro Sekunde aufhört, während unter gleichen Umständen das normale Auge einen zwei- bis dreifach schnelleren Lichtwechsel erforderte.

Von theoretischen Fragestellungen abgesehen ist hierdurch

ein weiterer Unterschied zwischen dem Sehen des total Farbenblinden und dem farblosen Sehen normaler Personen festgestellt, ein Unterschied, der sich dem lange bekannten der Sehschärfe anschliefst. Als besonders beachtenswert ist hervorzuheben, dafs auch in dieser Hinsicht ein Unterschied nicht mehr besteht, sobald unter den Bedingungen des Dämmerungssehens beobachtet wird, und der Unterschied erst unter solchen Umständen hervortritt, die auch für das Sehen von Farben die Möglichkeit gewähren. Wie befriedigend sich die neue Tatsache den Anschauungen der Stäbchentheorie einfügt, das ist so unmittelbar einleuchtend, dafs jede Hinzufügung darüber entbehrlich erscheint.

Im Anschlufs an die obige Mitteilung möchte ich ferner noch mit einigen Bemerkungen auf eine unlängst erschienene Untersuchung von Porter [1] eingehen, deren Ergebnisse in diesem Zusammenhange von besonderem Interesse sind. P. ermittelte, wie die für das Verschwinden des Flimmerns erforderliche Frequenz der Lichtwechsel von der Intensität der Beleuchtung abhängt und zwar für einen sehr grofsen Spielraum der Beleuchtungen. Er fand nun, dafs die diese Abhängigkeit ausdrückende Kurve sich deutlich aus zwei Stücken zusammensetzt, die, beide nahezu gradlinig, fast unvermittelt mit einem Knick ineinander übergehen. Jeder der Teile stellt eine gleichartige Abhängigkeit dar (die Verschmelzungsfrequenz wächst proportional dem Logarithmus der Beleuchtung), aber der eine mit einer, der andere mit einer anderen Konstanten. — Diese Erscheinung stellt nun für die zeitliche Unterscheidungsfähigkeit genau das Nämliche dar, wie es von König [2] für die räumliche, die Sehschärfe, gefunden wurde.

König fand die Abhängigkeit der Sehschärfe von der Beleuchtung ebenfalls in zwei Gebiete auseinanderfallend; in beiden wächst die Sehschärfe dem Logarithmus der Beleuchtung proportional, aber in dem einen Stück langsam, im anderen weit schneller, so dafs die ganze Kurve sich aus zwei verschieden geneigten und mit scharfer Ecke zusammenstofsenden gradlinigen Stücken zusammensetzt. Aber auch die Beleuchtungsstärken bei denen die Portersche und die Königsche Kurve

---

[1] *Proceedings of the Royal Society London* 70, S. 313.

[2] *Sitzungsberichte der Berliner Akademie* 1897, S. 559.

ihren Knick zeigen, sind sehr nahezu dieselben. Porter gibt diesen Wert auf eine Kerze im Abstand von 2 m (also $^1/_4$ M.K.) an; doch ist zu berücksichtigen, dafs bei den rotierenden Scheiben mit gleichen schwarzen und weifsen Sektoren diese Helligkeit nur mit ihrer Hälfte in Betracht kommt (also $^1/_8$ M.K.). Der Knick der Königschen Kurve liegt bei einer Beleuchtung zwischen 0,1 und 0,2, gerechnet in Einheiten, die die Beleuchtung durch ein Hefnerlicht aus 1 m Abstand bedeuten. Das Verhältnis von Porters Kerze zum Hefnerlicht ist nicht genau bekannt; da aber die üblichen Normalkerzen von diesem nicht sehr verschieden sind, so ist ersichtlich, dafs beide Werte in der Tat mit der hier in Frage kommenden Genauigkeit zusammenfallen.

Sehschärfe und die durch die Flimmerbeobachtungen gemessene zeitliche Unterscheidungsfähigkeit hängen also von der Beleuchtung in ganz ähnlicher Weise ab; bei geringsten Lichtstärken wachsen beide langsam; bei einer annähernd bestimmten Stärke ändert sich sprungweise für beide die Art der Abhängigkeit und es tritt ein viel schnelleres Wachsen ein, welches natürlich nicht unbegrenzt, aber bis zu sehr hohen Lichtstärken in annähernd konstanter Weise stattfindet.

Wie König damals sogleich bemerkte, ist die sich unmittelbar aufdrängende Deutung die, dafs bei den niedrigsten Intensitäten ein Bestandteil des Sehorgans in Betracht kommt, der dann, wenn die Intensität einen gewissen Wert übersteigt, von einem anderen abgelöst wird und diesem gegenüber alsbald zurücktritt, eine Anschauung, die ja den wesentlichen Inhalt der Stäbchenhypothese ausmacht. Die ganze Erscheinung ist also auf dem Boden der Stäbchenhypothese unmittelbar verständlich. Das Gleiche gilt von dem analogen Befunde Porters. Auch die anderen speziellen Werte, um die es sich handelt, stehen mit dem hiernach zu erwartenden in guter Übereinstimmung. Porter fand den Knick seiner Kurve bei einer Frequenz von etwa 18 Lichtwechseln pro Sekunde, fast genau übereinstimmend mit demjenigen Wert, den Schaternikoff erreichen konnte, wenn er die Lichter unterhalb derjenigen Grenze hielt, bei der sie auf den farbentüchtigen Bestandteil des Sehorgans zu wirken anfangen. Als Schwelle des fovealen Sehens fand Pertz die Helligkeit einer Magnesiumoxydfläche, die von einem Hefner-

licht aus der Entfernung von 5,5 M. bestrahlt wird. Danach dürften jene von König und Porter gefundenen Beleuchtungen die wirkliche Zapfenschwelle nicht ganz unerheblich (etwa um das 2—3fache) übertreffen; indessen versteht sich auch von selbst, dafs der Knick jener die Abhängigkeit darstellenden Kurven erst da zu erwarten ist, wo die Wirkung der Zapfen gegenüber der der Stäbchen erheblich ins Gewicht fällt. — Eine gewisse Unsicherheit haftet übrigens den Ergebnissen Porters insofern an, als die Adaptationszustände nicht speziell berücksichtigt worden sind. Da aber die Beobachtungen bei schwachem Licht wohl alle mit gut dunkeladaptiertem Auge ausgeführt worden sein werden, so dürften die entscheidenden Punkte hierdurch nicht in Frage gestellt werden.

(Eingegangen am 23. April 1903.)

(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Quantitative Untersuchungen über die Bleichung des Sehpurpurs in monochromatischem Licht.

Von

Dr. Wilhelm Trendelenburg,
Assistent am Institut.

I. Literatur, Plan der Untersuchung.

Das grofse Interesse, welches man dem von Boll entdeckten, von Kühne als chemischen Stoff erkannten Sehpurpur entgegenbrachte, mufste im Laufe der Erweiterung unserer Kenntnisse, welche wir hauptsächlich den umfassenden Arbeiten Kühnes und seines Mitarbeiters Ewald verdanken, mehr und mehr zurücktreten, einiger Tatsachen wegen, welche heutzutage die Aufmerksamkeit gerade wieder ganz besonders auf den rätselhaften lichtempfindlichen Stoff zurücklenken. Die nähere Untersuchung zeigte, dafs der Sehpurpur, welcher ja nur der einen Art der lichtempfindlichen Netzhautelemente, den Stäbchen, zukam, in der menschlichen Fovea vollkommen fehlte, in der Stelle also, mit welcher gerade das deutlichste Sehen möglich war. Dafs Frösche, welche im Dunklen Sehpurpur bilden, im grellen Licht, also ohne Sehpurpur noch ganz vorzüglich sehen, wurde schon von Kühne (8) gezeigt, und von ihm weiter eine grofse Anzahl von Tieren gefunden, welche keinen Sehpurpur zu bilden vermögen, deren Auge aber auch stäbchenlos ist. Während Kühne deshalb an die von M. Schultze vergleichend anatomisch begründete Hypothese von der Bedeutung der Stäbchen anknüpfte, findet man noch bis in die neueste Zeit hinein die Meinung vertreten, dafs der Sehpurpur wegen seines zentralen Fehlens u. dgl. keine direkte Beziehung zum Sehen haben könne. So schien der Sehpurpur längere Zeit nur eine nicht näher verständliche Merkwürdigkeit darzustellen.

Ein bedeutender Umschwung trat hierin ein, als eine Gruppe von Erscheinungen bekannt und näher erforscht wurde, welche

v. Kries als „Dämmerungssehen“ zusammengefaſst hat. Es erscheint hier nicht nötig, eine nähere Schilderung und Begründung für die v. Kriessche Hypothese über die Bedeutung des Stäbchen-Sehpurpurapparates zu geben; im Hinblick auf das Gesagte sei hier nur erwähnt, daſs gerade das zentrale Fehlen des Dämmerungssehens auf eine Einrichtung lediglich der peripheren Netzhautteile hinwies.

Nachdem somit dem Sehpurpur neue und wichtige Eigenschaften zugeschrieben wurden, war es notwendig, seine physikalisch-chemischen Eigenschaften näher zu erforschen. Die groſse Menge von Fragen, welche Kühne angriff, war nunmehr mit neuen technischen Hilfsmitteln erneut zu bearbeiten. Über die Absorption des Sehpurpurs verdanken wir sehr genaue Kenntnisse den Arbeiten von König (3) und Köttgen u. Abelsdorff (5), von denen ersterer schon wichtige Beziehungen der Sehpurpurabsorption zum Dämmerungssehen aufdeckte. Über die Bleichung des Sehpurpurs durch spektrales Licht sind hingegen keine neueren Untersuchungen veröffentlicht worden, ältere wurden auſser von Boll, von Kühne und von Hamburger angestellt. In einer ersten Versuchsreihe entwarf Kühne (7) ein Spektrum von 3 cm Höhe und 6 cm Länge auf eine Milchglasscheibe, auf welcher Streifen von purpurhaltiger Kaninchennetzhaut oder Froschnetzhäute aufgelegt waren. Nach 20 Minuten war bei letzteren die Bleichung zwischen den Linien *D* und *E* (589 $\mu\mu$ und 527 $\mu\mu$) am stärksten. „Von dem einfarbigen Lichte wirken mit abnehmender Geschwindigkeit: Grüngelb, Gelbgrün, Grün, Blaugrün, Grünblau, Cyan, Indig, Violett — später reines Gelb, Orange, viel später Ultraviolett und Rot.“ Auch Kaninchennetzhäute werden am stärksten vom Licht zwischen *D* und *E* gebleicht. „Am auffälligsten — — scheint mir die aus den Spektralbeobachtungen hervorgehende, hocherfreuliche Tatsache, daſs dasjenige Licht, das unser Auge im Spektrum am meisten affiziert und darin das intensivste zu sein scheint, nämlich das Grüngelb auch den Sehpurpur zuerst verändert.“ Dieser Satz, welchen Kühne aus seinen ersten Beobachtungen folgerte, ist auch heute noch gültig, wenn auch in anderem Sinne, wie er hier aufgestellt ist. — In Gemeinschaft mit Ewald setzte Kühne (1) später diese Beobachtungen fort mit im wesentlichen dem gleichen Resultat. Der Anfang einer quantitativen Bestimmung der Bleichungsstärke liegt in folgendem Versuch.

Mittels des Helmholtzschen Doppelspaltes wurden aus einem Spektrum des Sonnenlichts reines Grün und reines Blau (Wellenlängen nicht angegeben) isoliert; war der Spalt für Grün 2 mm breit, der für Blau 3 mm, so wirkte Grün deutlich stärker bleichend; gleich schnelle Wirkung ergab sich, als die Spaltweite für Grün 1 mm, für Blau 4 mm betrug. Eine weitere Reihe von Versuchen wurde am Interferenzspektrum angestellt, wobei die gleichen Resultate erzielt wurden, wie mit dem Dispersionsspektrum. Während die bisher angeführten Beobachtungen sich auf purpurhaltige Netzhäute beziehen, wurden in folgender Weise Versuche an Lösungen angestellt. Auf einer Glasplatte waren im Spektrum kleine getrennte Tropfen einer klaren Sehpurpurlösung verteilt, welche von Zeit zu Zeit in sehr gedämpftem Tageslicht betrachtet wurden. Auch hier war wieder die schnellste Wirkung im Gelbgrün und Grün von *D* an zu konstatieren. Daran schliefsen sich endlich noch Versuche über intravitale Ausbleichung mit Spektralfarben an, deren Ergebnis mit den vorigen durchaus übereinstimmt. Die Farben wurden durch einen Spalt aus einem Spektrum ausgeschnitten und durch eine Linse auf das Auge eines Frosches geworfen. Auch hier wurde wieder die Ausbleichung am schnellsten im Gelbgrün und Grüngelb erzielt.

Abgesehen von der erwähnten Beobachtung Kühnes wurde der erste Versuch einer quantitativen Untersuchung der Sehpurpurbleichung von Hamburger (2) gemacht, in der Absicht, dadurch auf indirektem Wege genauere Kenntnisse über die Absorptionsverhältnisse des Sehpurpurs zu gewinnen. Mit Hilfe eines Suggschen Brenners von 50 Kerzen wurde ein Spektrum von 5 cm Länge (von *A* bis *H*) hergestellt, in welchem die Netzhäute exponiert wurden. Deren Farbe wurde verglichen mit den Farbentafeln von Chevreul, welche die entsprechenden Farbtöne enthielten. Mit Hilfe derselben wurde festgestellt, nach welchen Zeiten an den verschiedenen Stellen des Spektrum in der Grundfarbe der Netzhaut die erste merkbare Veränderung entsteht. Es fand sich:

Für	D	. . . . $20\frac{1}{2}$	Stunden
„	$E-b$	. . . . $7\frac{1}{2}$	„
„	$b-\frac{1}{2}F$	. . . . $10\frac{1}{2}$	„
„	F	 14	„

Hamburger berechnete diese Zahlen weiter auf das Interferenzspektrum von gleicher Energieverteilung; für unsere Zwecke geben die reziproken Werte der Bleichungszeiten die „Bleichungswerte" der Lichter. Sie sind für $Na = 1$:

D	1
$E—b$	2,73
$b—{}^1/_2F$	1,95
F	1,46

Es leuchtet ein, daſs mit dieser Untersuchung nur ein erster Schritt in unserer genaueren Kenntnis über die Einwirkungsstärke spektraler Lichter getan ist, und daſs neuere Hilfsmittel mannigfache Verbesserungen der ganzen Methodik zulassen. Ich folgte deshalb gerne der Aufforderung von Herrn Prof. v. Kries, den Gegenstand erneut zu untersuchen und dabei vor allem eine quantitative Bestimmung der bleichenden Wirkung spektraler Lichter zu erstreben. Ich erfreute mich bei der Untersuchung der weitgehendsten Mitarbeit und Beratung meines verehrten Lehrers, besonders bei der Ausarbeitung der Methode, welche nur dadurch zur Überwindung der Schwierigkeiten geeignet wurde. Ich möchte auch an dieser Stelle mir gestatten, meinen verbindlichsten Dank dafür auszusprechen. Bei einer groſsen Zahl vorläufiger Versuchsreihen wurde ich in freundlichster Weise von Herrn Prof. Kingsbury aus Ithaka U. S. A. unterstützt, welchem ich ebenfalls meinen Dank abstatten möchte; leider war eine weitere gemeinsame Fortsetzung der Arbeiten wegen seiner Rückkehr in die Heimat nicht möglich.

Da nach den theoretischen Voraussetzungen der Sehpurpur als Sehsubstanz, als Reizvermittler des Stäbchenapparates aufzufassen ist und dessen Funktion dem Dämmerungssehen zugrunde liegt, so ist es von Interesse zu wissen, wie der Reizwert spektraler Lichter im Dämmerungssehen mit der Stärke der bleichenden Wirkung derselben auf den Sehpurpur zusammenhängt. In der Untersuchung dieser Frage lag eine Hauptaufgabe vorliegender Arbeit. Zwischen den Reizwerten spektraler Lichter für das total farbenblinde Auge und der Absorptionskurve des menschlichen Sehpurpurs hat König (3) eine Beziehung festgestellt, auf die später noch näher eingegangen werden soll. So wertvoll das Resultat seiner Berechnung ist, so ist es doch nur gültig

unter der Voraussetzung, dafs die Absorptionskurve des Sehpurpurs sich einwandsfrei ermitteln läfst. Hier stellt sich aber einstweilen noch darin eine Schwierigkeit entgegen, dafs es noch nicht gelingt, völlig reine Purpurlösungen zu erhalten, sondern dafs nach der Bleichung gefärbte Rester zurückbleiben, deren Absorption in Abrechnung gebracht werden mufs, wenn man die Absorptionskurve des reinen Purpurs erhalten will. Dies Verfahren ist aber nur dann zulässig, wenn es sicher ist, dafs in dem Restfarbstoff kein Bleichungsprodukt des Sehpurpurs vorliegt. Wenn dies auch einigermafsen wahrscheinlich ist, so ist es doch wünschenswert, direkt die Stärke der bleichenden Wirkung spektraler Lichter auf den Sehpurpur zu untersuchen. Ist es doch auch von vornherein nicht abzusehen, ob die chemische Wirkung lediglich von der Menge der absorbierten Lichtenergie abhängt, oder ob ein Teil in andere Energieformen, besonders in Wärme umgewandelt wird.

Es wird im folgenden zunächst die Stärke der bleichenden Wirkung eines Spektrallichtes auf den Sehpurpur, gemessen an der Bleichungsgeschwindigkeit, ermittelt (Abschnitt II). Wird die Bleichungsstärke auf eine für irgendein Spektrallicht angenommene Einheit bezogen, so ergibt sich für jedes andere Licht ein die Bleichungsstärke desselben angebender Wert, der als „Bleichungswert“ desselben bezeichnet werden möge. Ein solcher Bleichungswert ist aber nur für unendlich dünne Sehpurpurschicht definierbar, weil bei endlicher Schicht ein von der Schichtdicke abhängiger Anteil des auffallenden Lichtes absorbiert wird, so dafs die bleichende Lichtmenge nicht gleich der gesamten auffallenden Lichtmenge ist. Unter der Annahme, dafs der chemische Erfolg der Stärke des einwirkenden Lichtes direkt proportional gesetzt werden kann, lassen sich aber aus den bei endlichen Schichtdicken beobachteten Bleichungsverhältnissen die für unendlich dünne Schichten ermitteln. Man mufs nur aus der durch die Absorption bewirkten Lichtschwächung diejenigen Lichtstärken berechnen, welche auf die verschiedenen vom Licht nacheinander durchlaufenen unendlich dünnen Schichten tatsächlich einwirken. Es sei J die auf eine Lösung von der Dicke P auftreffende Lichtstärke. Ferner erfahre das Licht beim Durchgange durch die unendlich dünne Schicht dp eine Schwächung im Verhältnis von $1 : e^{-\alpha\, dp}$. Es ist dann die

durch die ganze Schicht durchgelassene Lichtstärke $= Je^{-aP}$, ein Wert, der mit δ bezeichnet werde und der sich direkt bestimmen läfst. Unter diesen Umständen wird nun die chemische Wirkung des Lichtes nicht derjenigen Stärke proportional zu setzen sein, mit der es auf die vordere Grenze der Lösung auftrifft, sondern derjenigen, mit der es durchschnittlich in der ganzen Schicht tatsächlich vorhanden ist, d. h. dem Werte

$$\frac{1}{P}\int_0^P e^{-ap}\,dp.$$

Dieser Wert sei c. Er stellt also einen Koeffizienten dar, mit dem wir die auftreffende Lichtstärke multiplizieren müssen, um die tatsächlich zur Einwirkung gelangende Lichtstärke zu erhalten. Sind c_1 und c_2 diese Koeffizienten für zwei Lichter, und erhalten wir für diese bei endlicher Schichtdicke ein Verhältnis der Bleichungswerte von $\frac{B_1}{B_2}$, so werden die Lichter für unendlich dünne Schicht ein Bleichungswertverhältnis von $\frac{B_1}{B_2} \cdot \frac{c_2}{c_1}$, haben. Der Wert $\frac{1}{P}\int_0^P e^{-ap}\,dp$ ergibt sich aus der direkt zu beobachtenden Schwächung des Lichtes in der ganzen angewandten Schicht. Es ist nämlich

$$\frac{1}{P}\int_0^P e^{-ap}\,dp = \frac{1}{aP}\left(1-e^{-aP}\right) = \frac{1-\delta}{ln\,\delta}.$$

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich freilich daraus, dafs mit dem Fortschreiten der Bleichung ja auch die Absorptionen sich dauernd ändern, also jene zur Umrechnung dienenden Koeffizienten dauernd andere Werte erhalten. Wie sich trotzdem die Umrechnungen mit genügender Genauigkeit durchführen lassen, wird weiter unten besprochen.

Die Bleichungswerte sind dann den theoretischen Vorstellungen gemäfs mit den Dämmerungswerten des gleichen Spektrum zu vergleichen. Sind diese durch den Sehpurpur vermittelt, so müssen sie ebenfalls, entsprechend den besprochenen

Verhältnissen, von der Menge des vom Licht im Auge durchsetzten Sehpurpurs abhängen. Tatsächlich unterliegen sie im Verlauf der Adaptation einer Änderung, welche ganz im Sinne der theoretischen Erwartung liegt. Auf diese Beziehungen wird im folgenden noch zurückzukommen sein.

Während die Bestimmung der Dämmerungswerte im Abschnitt III enthalten ist, werden des weiteren Messungen über die Lichtabsorption im Sehpurpur und ihre Beziehungen zu den Dämmerungswerten behandelt.

Die Hauptresultate der vorliegenden Arbeit wurden in einer vorläufigen Mitteilung im „*Zentralblatt für Physiologie*" (17, 720—723) veröffentlicht.

II. Bleichung des Sehpurpurs.

Die vorliegende Methode der quantitativen Bestimmung des Bleichungsverlaufs unter dem Einflufs verschiedener monochromatischer Lichter ergab sich nach zahlreichen Vorversuchen, die ich füglich übergehen kann, Versuche, in denen nicht nur die Grundzüge der Methode, sondern auch die einzelnen Hilfsmittel die mannigfachste Veränderung und Verbesserung erfuhren.

War das theoretisch geforderte Ziel eine Feststellung der Einwirkungsstärke von Licht verschiedener Wellenlänge und ein quantitativer Vergleich derselben für die einzelnen Lichter, so war damit die Aufgabe gestellt, die in der Zeiteinheit umgesetzten Mengen festzustellen, oder, was auf dasselbe hinauskommt, die nach Belichtung von bestimmter Dauer noch vorhandene Menge des unzersetzten Stoffes. Es liegt auf der Hand, dafs diese Quantitätsbestimmung einstweilen nur auf kolorimetrischem oder spektrophotometrischem Wege erfolgen konnte. Wir wählten die letztere Methode, welche unzweifelhaft den Vorteil gröfserer Genauigkeit hat. Bei dem Zusammenhang zwischen Lichtabsorption und Konzentration einer Lösung ist durch die Bestimmung der Lichtabsorption und ihrer Änderung im Verlaufe der Bleichung mittelbar die Konzentrationsänderung gegeben.

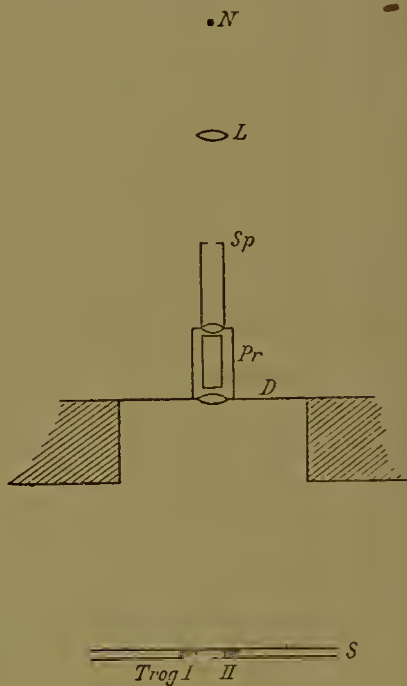
Zur Spektrophotometrie diente der grofse Helmholtzsche Farbenmischapparat mit eingefügtem Lummerschen Prisma. Durch dieses wurden die vom Kollimator II kommenden Strahlen als Mittelfeld in den vom Kollimator I gelieferten

Farbenring verlegt. Die Gröfse des Gesamtfeldes betrug 2°. Die Kollimatoren wurden bei Nullstellung der Doppelspate auf die gewünschte Spektralfarbe eingestellt und bei feststehendem Spalt I Helligkeitsgleichheit mittels Spalt II hergestellt. Dann wurde die Sehpurpurlösung in den gleich zu beschreibenden Trögen in den Gang der durch den Lummerschen Fleck gehenden Lichtstrahlen gebracht und durch erneute Einstellung von Spalt II Helligkeitsgleichheit hergestellt. Aus beiden Einstellungen ergibt sich die von der Sehpurpurlösung absorbierte Lichtmenge in einfacher Weise. Eine spezielle Einrichtung war erforderlich, um den Trog mit Genauigkeit rasch in den Gang der Lichtstrahlen des Kollimator II vor den Lummerschen Fleck zu bringen. Zu diesem Zweck war an dem Stativteil, welcher gewöhnlich für die Königsche Anordnung zur Beimischung unzerlegten Lichtes dient, eine Schlittenführung angeschraubt, auf welche der Trog mit der Sehpurpurlösung fest aufgeschoben werden konnte. Durch die Schlittenführung, welche senkrecht zum Gang der Lichtstrahlen lief, wurde der Trog gegen diese geschoben, bis ein Anschlag ihn genau vor dem Fleck fixierte. Die Innenbreite des Troges von 4 mm war so gewählt, dafs sie den Fleckdurchmesser nur eben übertraf. Es wurden drei Einstellungen mit vorgeschobener Purpurlösung gemacht, nach jeder wurde der Trog aus dem Lichtbündel zurückgeschoben, um unnötige Belichtung zu vermeiden. Vor und nach den drei Trogeinstellungen wurden je drei Einstellungen ohne Trog notiert und aus allen 6 das Mittel in Rechnung gezogen. Dies war erforderlich, weil beide Kollimatoren von eigenen Lampen erleuchtet wurden und geringe Helligkeitsschwankungen nicht auszuschliefsen waren. Dafs durch die in den Bleichungsverlauf eingeschalteten Absorptionsbestimmungen und die dabei unvermeidlichen Belichtungen keine merkliche Bleichung erfolgte, ist weiter unten näher gezeigt. Bemerkenswert ist noch, dafs die Absorptionsbestimmungen immer bei tunlichst geringer Lichtstärke (geringer Weite des Spalts am Kollimator I) vorgenommen wurden.

Die Versuchsanordnung für die Bleichungen ist in Figur 1 angegeben. Ein gradsichtiger Spektralapparat mit dem Prima *Pr* und dem Spalt *Sp* war in ein zwischen zwei Zimmern befindliches Diaphragma *D* lichtdicht eingepafst. Ein achromatisches Linsensystem *L* entwarf von dem glühenden

Stäbchen der Nernstlampe *N*, deren Mattglocke entfernt war, ein nahezu objektgrofses Bild auf den Spalt *Sp*; das durch das Prisma *Pr* entworfene Spektrum fiel in die Ebene des Skalenstabes *S*, auf welchem sich zwei Schieber befanden, die auf dem Skalenstab längsverschiebbar waren, und auf welche die mit der Sehpurpurlösung gefüllten Tröge fest aufgeschoben werden konnten. Es war dafür gesorgt, dafs die (annähernd horizontalen) strichförmigen Schatten, welche die um das glühende Stäbchen liegende Heizspirale im Spektrum erzeugt, nicht auf die Lösung projiziert wurden; letztere befand sich vielmehr vollständig im Intervall zwischen 2 derartigen Schatten.

Fig. 1.
Anordnung der Bleichungsversuche.



Mafsstab 1 : 30.

Die Spaltweite *Sp* wurde so gewählt, dafs einerseits ein Spektrum von genügender Intensität in der Skalenebene entworfen wurde, andererseits das Bild des Nernststäbchens die Spaltränder genügend übergriff. Die Spaltbreite, welche diese Bedingungen erfüllte, betrug 0,36 mm, ihre Projektion in der Skalenebene 1,8 mm. Das Spektrum wurde durch Bestimmung der Natrium- und Thalliumlinie, sowie der violetten Heliumlinie von 446 $\mu\mu$ (letztere nach Tschermak (13) geaicht, für die zwischenliegenden Skalenteile wurde nach der Formel $S = A + \frac{B}{\lambda^2}$ interpoliert. Die Breite des Spektrum betrug von 589 $\mu\mu$ bis 446 $\mu\mu$ 69,6 mm. Auf die beiden Schieber, welche, wie gesagt, auf dem Skalenmafsstab längsverschieblich sind, waren in der dazu senkrechten Richtung die geeignet gefafsten Tröge I und II leicht aufschiebbar, und zwar so, dafs weder eine Verwechslung beider Tröge vorkommen konnte, noch die Skalenschieber, welche nicht zu leicht beweglich waren, eine Ortsänderung erlitten. Die zur Aufnahme der Sehpurpurlösungen bestimmten Tröge wurden uns von der Firma Zeiss-Jena an-

gefertigt. Eine Innenplatte von 3 mm Dicke enthält einen rechtwinkligen Ausschnitt von 4 mm Breite (und 4 cm Tiefe). Auf diese Glasplatte ist beiderseits eine planparallele Glasplatte aufgekittet. Von abnehmbaren, etwa aufgeschraubten Platten sahen wir aufser wegen der schwierigen Dichtung hauptsächlich deshalb ab, weil vollständig gleiche Dicke beider Tröge ein Haupterfordernis war. Für die Dicke der Innenplatte, durch welche die Schichtdicke der Sehpurpurlösung gegeben war, waren folgende Gesichtspunkte mafsgebend. Während einerseits die Absorptionsbestimmung bei gröfserer Schichtdicke genauer ausführbar ist, wie bei kleinerer, war andererseits die Bleichung nach Möglichkeit an einer dünnen Schicht vorzunehmen, um damit die Versuchsbedingungen den Verhältnissen am menschlichen Auge möglichst zu nähern. Der Versuch, die Bleichung bei geringerer Schichtdicke vorzunehmen, als die Absorptionsbestimmung, führte aber zu keinem befriedigenden Resultat, so dafs die Reduktion auf geringe Schichtdicke durch Rechnung ausgeführt werden mufste, und Bleichung und Absorptionsbestimmungen bei ein und derselben Schichtdicke vorgenommen wurden.

Eine Fehlerquelle könnte in ungleicher Erwärmung der Lösungen in den verschiedenen Spektralteilen liegen. Wurde aber, wie bei den Vorversuchen mit Froschsehpurpur festgestellt wurde, ein Trog durch einen kalten vermittels eines spitzen Glasrohrs gegen ihn gerichteten Luftstroms während der Bleichung abgekühlt, so war kein Unterschied zu konstatieren. Der Einflufs einer eventuellen verschiedenen Temperierung dürfte also in die Fehlergrenzen fallen.[1]

Der Gang der Versuche gestaltete sich folgendermafsen. Aus einer Glaspipette werden die Tröge mit gleicher Sehpurpurlösung (über deren Herstellung s. später) gefüllt, mit kleinen Korken zum Schutz gegen Verdunstung geschlossen und auf einer lichtdichten Unterlage mit schwarzen Papphülsen überdeckt. An der Bleichungseinrichtung wird die Lage der Natriumlinie bestimmt und der eine Schieber auf der Skala so eingestellt, dafs nachher die Mitte des aufgeschobenen Troges (Trog I) an

---

[1] Nach Nernst (Theoretische Chemie, 4. Aufl., 1903, S. 733) steigt die Geschwindigkeit photochemischer Reaktionen zum Unterschied gegen gewöhnliche chemische Reaktionen mit zunehmender Temperatur nur sehr wenig an.

die Stelle der Natriumlinie kommt. Der andere Schieber wird so eingestellt, dafs die Mitte des anderen, rechten Troges (Trog II) in ein bestimmtes anderes Licht des Spektrums fällt. Hierfür wurden gewählt 542 $\mu\mu$, 530 $\mu\mu$, 519 $\mu\mu$, 509 $\mu\mu$, 491 $\mu\mu$, 474 $\mu\mu$, 459 $\mu\mu$, deren Abstand voneinander auf der Skala 5 bzw. 10 mm betrug. Mit dem rechten Trog noch näher an den linken heranzurücken als wie bis 542 $\mu\mu$, war wegen der unvermeidlichen Trogränder nicht möglich. Es wurde also die Bleichung bei einem der genannten kurzwelligeren Lichter stets gleichzeitig mit einer Vergleichsbleichung im Natriumlicht ausgeführt, so dafs die Bleichungswerte auf die für Natriumlicht = 1 bezogen werden konnten. Etwa auftretende Ungleichheiten der Lichtintensität der Nernstlampe zwischen den einzelnen Versuchen konnten so keinen störenden Einflufs ausüben. Es erwies sich im allgemeinen als vorteilhaft, in $^1/_2$ stündigen Intervallen die Lichtabsorption der Sehpurpurlösungen zu bestimmen, nur bei langsam bleichenden Lichtern wurden längere Intervalle gewählt, wie des näheren aus den Tabellen ersichtlich ist. Die Belichtungszeit wurde jedesmal durch Verschlufs der Öffnung zwischen beiden Zimmern abgebrochen, die Tröge bei rotem Licht abgenommen und sofort überdeckt. Nach der Absorptionsmessung wurde die Bleichungsanordnung bei rotem Licht wiederhergestellt und durch Öffnen des Schiebeverschlusses die Belichtung in gleicher Weise wie vorher fortgesetzt. Eine Änderung des Ortes der Natriumlinie trat während der Versuche nie ein, nach dem Versuch oder am nächsten Tag war die Einstellung für Natrium die gleiche, wie vorher; eine Kontrolle über den Stand der Natriumlinie brauchte deshalb während des Versuchs nicht ausgeführt zu werden. Da die Absorptionsbestimmung nur Konzentrationsänderungen ermitteln soll, erscheint es von vornherein gleichgültig, bei welchem Licht die Bestimmung ausgeführt wird. Es war aber nötig, einen durch die Versuchsbedingungen bestimmt vorgeschriebenen Weg einzuschlagen, durch welchen ermöglicht wurde, die schon oben besprochene rechnerische Korrektion auf unendlich dünne Schicht auszuführen. Es war dies möglich, wenn die Lichtabsorption stets bei dem gleichen Licht bestimmt wurde, bei welchem die jedesmalige Bleichung vor sich ging. Da nun aber gleichzeitig zwei Lösungen in verschiedenen Lichtern bleichten, wurde folgendes Verfahren eingeschlagen. Es wurde sowohl für den Trog, der im Natriumlicht, als auch

für den, welcher in einem kurzwelligeren Licht exponiert war, die Absorption im Bleichungsverlauf mittels des kurzwelligeren Lichtes am Spektrophotometer bestimmt. Daneben wurde für den im Natriumlicht exponierten Trog die Absorption zu Anfang und an erforderlicher Stelle während des Bleichungsverlaufs mittels des Natriumlichtes bestimmt. Nach diesen letzteren Bestimmungen konnte dann eine Korrektion auch für die Bleichung im Natriumlicht angebracht werden. Die Komplizierung der Absorptionsbestimmung hatte natürlich einen Nachteil darin, dafs mehr Zeit zwischen den halbstündigen Expositionen verstrich und dafs durch die zahlreicheren photometrischen Bestimmungen die Möglichkeit einer weiteren Bleichung vermehrt wurde. Es wurden daher die Einstellungen tunlichst rasch gemacht und die Lösungen sorgfältigst vor jedem schädlichen Licht geschützt. In einem Falle (Versuch XIX) wurde das Verfahren noch ein wenig modifiziert. Das kurzwellige Licht war hier 459 $\mu\mu$; die Absorption ist hier schon so gering, dafs die Messungsfehler zu sehr ins Gewicht fallen; um genauere Werte für den Bleichungsverlauf zu haben, wurde zunächst die Absorption bei einem dem Absorptionsmaximum nahestehenden Licht (509 $\mu\mu$) bestimmt, dann für Trog I bei 589 $\mu\mu$, für Trog II bei 459 $\mu\mu$; nach den ersteren Bestimmungen wurde das Zahlenverhältnis der Bleichungsgeschwindigkeit, nach den letzteren die Korrektion bestimmt. Im allgemeinen wurden die Versuche nach zweistündiger Belichtungsdauer abgebrochen, da eine weitere Verfolgung der Bleichung in den Vorversuchen keine befriedigenden Resultate gegeben hatte. Zum Schlufs wurden die Lösungen im Sonnenlicht, hellen Tageslicht oder direkten Nernstlicht ganz ausgebleicht und nochmals die Absorption bestimmt.

Im folgenden seien zunächst die einzelnen Versuche, welche an Kaninchensehpurpur angestellt wurden, tabellarisch wiedergegeben. Ich übergehe alle Vorversuche an Froschsehpurpur, nach welchen noch manche Einzelheiten verbessert werden konnten, so dafs den hier ausführlich mitgeteilten Reihen ein höherer Grad von Genauigkeit und Zuverlässigkeit zukommt. In den folgenden Tabellen enthält der erste Stab die Zeit in Minuten vom Beginn der Belichtung an (wo natürlich nur die Zeit der Belichtung, nicht die der Absorptionsbestimmungen mitgerechnet wurde). Die drei nächsten Stäbe enthalten die für

die betreffenden Zeitpunkte der Belichtung gültigen Absorptionswerte, Stab 2 und 3 im kurzwelligeren Licht, Stab 4 im Natriumlicht. Bemerkt sei noch, dafs nicht etwa eine Auswahl des Materials, sondern alle mit Kaninchensehpurpur angestellten Versuche wiedergegeben sind, um eine Beurteilung des Grads der Genauigkeit zu ermöglichen. (Nur der erste Versuch wurde nicht wiedergegeben, weil er an einem vor längerer Zeit hergestellten und dadurch langsamer bleichenden Präparat von Kaninchensehpurpur mit weniger vollkommener Methode angestellt war; trotzdem reiht er sich befriedigend in die vorliegenden Versuche ein.)

Versuch I. Kaninchensehpurpur 21. VII. 03 a. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 542 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte		
	bei 542 $\mu\mu$		bei 589 $\mu\mu$
	für Trog I	für Trog II	für Trog I
0	0,5087	0,5044	0,1617
30	0,4548	0,3771	
60	0,4108	0,2967	
90	0,3655	0,2043	0,1309
120	0,3330	0,1777	
Ganz gebleicht	0,1661	0,1704	

Versuch II. Kaninchensehpurpur 7. VIII. 03 a. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 542 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte		
	bei 542 $\mu\mu$		bei 589 $\mu\mu$
	für Trog I	für Trog II	für Trog I
0	0,5388	0,5436	0,2491
30	0,4811	0,3939	
60	0,4605	0,3000	
90	0,4343	0,2544	0,2017
120	0,4064	0,2335	
Ganz gebleicht	0,2164	0,2072	

Versuch III. Kaninchensehpurpur 16. VII. 03.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 530 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 530 $\mu\mu$ für Trog I	Absorptionswerte bei 530 $\mu\mu$ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 $\mu\mu$ für Trog I
0	0,5149	0,5182	0,1901
30	0,4603	0,3665	
60	0,4099	0,2852	
90	0,3754	0,2340	
120	0,3550	0,2174	
Ganz gebleicht	0,1708	0,1910	0,1635

Versuch IV. Kaninchensehpurpur 18. VII. 03 a. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 530 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 530 $\mu\mu$ für Trog I	Absorptionswerte bei 530 $\mu\mu$ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 $\mu\mu$ für Trog I
0	0,4742	0,4742	0,1926
30	0,4221	0,3323	
60	0,3972	0,2621	
90	0,3783	0,2346	0,1713
120	0,3571	0,2205	
Ganz gebleicht	0,1852	0,1818	

Versuch V. Kaninchensehpurpur 6. VIII. 03 p. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 530 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 530 $\mu\mu$ für Trog I	Absorptionswerte bei 530 $\mu\mu$ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 $\mu\mu$ für Trog I
0	0,6179	0,6139	0,2433
30	0,5532	0,4628	
60	0,5116	0,3474	
90	0,4733	0,2884	0,1742
120	0,4408	(0,2263)	
Ganz gebleicht	0,2533	0,2545	

Versuch VI. Kaninchensehpurpur 23. VII. 03 a. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 519 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte		
	bei 519 $\mu\mu$		bei 589 $\mu\mu$
	für Trog I	für Trog II	für Trog I
0	0,6016	0,6027	0,1426
30	0,5585	0,4896	
60	0,5120	0,4252	
90	0,4790	0,3705	0,1574
120	0,4489		
Ganz gebleicht	0,2531	0,2386	

Versuch VII. Kaninchensehpurpur 23. VII. 03. p. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 519 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte		
	bei 519 $\mu\mu$		bei 589 $\mu\mu$
	für Trog I	für Trog II	für Trog I
0	0,6055	0,6108	0,2019
30	0,5452	0,4705	
60	0,4997	0,3684	
90	0,4850	0,3686	0,1630
Ganz gebleicht	0,2635	0 2569	0,1492

Versuch VIII. Kaninchensehpurpur 6. VIII. 03. a. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 519 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte		
	bei 519 $\mu\mu$		bei 589 $\mu\mu$
	für Trog I	für Trog II	für Trog I
0	0,6719	0,6749	0,2188
30	0,6167	0,5211	
60	0,5898	0,4360	
90	0,5335	0,3633	0,1974
120	0,4821	0,3045	
Ganz gebleicht	0,2777	0,2575	

Versuch IX. Kaninchensehpurpur 10. VIII. 03. a. m.
Bleichlichter 589 μμ (Trog I) und 519 μμ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 519 μμ für Trog I	Absorptionswerte bei 519 μμ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 μμ für Trog I
0	0,5515	0,5488	0,1648
30	0,4891	0,4051	
60	0,4402	0,3214	
90	0,3979	0,2874	0,1284
120	0,3684	0,2332	
Ganz gebleicht	0,2062	0,2043	

Versuch X. Kaninchensehpurpur 25. VII. 03. a. m.
Bleichlichter 589 μμ (Trog I) und 509 μμ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 509 μμ für Trog I	Absorptionswerte bei 509 μμ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 μμ für Trog I
0	0,5967	0,5967	0,1937
30	0,5519	0,5008	
60	0,4961	0,4101	
90	0,4106	0,3536	0,1349
120	0,3716	0,3236	
Ganz gebleicht	0,2246	0,2297	

Versuch XI. Kaninchensehpurpur 25. VII. 03. p. m.
Bleichlichter 589 μμ (Trog I) und 509 μμ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 509 μμ für Trog I	Absorptionswerte bei 509 μμ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 μμ für Trog I
0	0,5948	0,5934	0,2049
30	0,5493	0,4930	
60	0,5121	0,4052	
90	0,4756	0,3380	0,1739
Ganz gebleicht	0,2428	0,2413	

Versuch XII. Kaninchensehpurpur 4. VIII. 03. p. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 509 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte		
	bei 509 $\mu\mu$		bei 589 $\mu\mu$
	für Trog I	für Trog II	für Trog I
0	0,6503	0,6503	0,2443
30	0,5985	0,5236	
60	0,5525	0,4013	
90	0,4993	0,3487	0,1889
Ganz gebleicht	0,2477	0,2375	

Versuch XIII. Kaninchensehpurpur 11. VIII. 03 a. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 509 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte		
	bei 509 $\mu\mu$		bei 589 $\mu\mu$
	für Trog I	für Trog II	für Trog I
0	0,5858	0,5867	0,2019
30	0,5551	0,5102	
60	0,5113	0,4093	
90	0,4801	0,3358	0,1552
120	0,4425	0,2974	
Ganz gebleicht	0,2559	0,2600	

Versuch XIV. Kaninchensehpurpur 28. VII. 03 a. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 491 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte		
	bei 491 $\mu\mu$		bei 589 $\mu\mu$
	für Trog I	für Trog II	für Trog I
0	0,6600	0,6610	0,2267
30	0,6317	0,6231	
60	0,5921	0,5576	0,2121
90	0,5504	0,5018	0,1987
120	0,5318	0,4522	
Ganz gebleicht	0,3327	0,3345	

Versuch XV. Kaninchensehpurpur 28. VII. 03 p. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 491 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 491 $\mu\mu$ für Trog I	Absorptionswerte bei 491 $\mu\mu$ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 $\mu\mu$ für Trog I
0	0,6371	0,6353	0,1970
30	0,6080	0,6060	
60	0,5801	0,5632	
90	0,5201	0,4975	0,1464
120	0,4876	0,4712	
Ganz gebleicht	0,3589	0,3551	

Versuch XVI. Kaninchensehpurpur 4. VIII. 03 a. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 491 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 491 $\mu\mu$ für Trog I	Absorptionswerte bei 491 $\mu\mu$ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 $\mu\mu$ für Trog I
0	0,6371	0,6320	0,1956
30	0,5957	0,5783	
60	0,5384	0,5238	0,1672
90	0,5013	0,4798	0,1612
120	0,4620	0,4324	
Ganz gebleicht	0,3073	0,3139	

Versuch XVII. Kaninchensehpurpur 30. VII. 03 a. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 474 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 474 $\mu\mu$ für Trog I	Absorptionswerte bei 474 $\mu\mu$ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 $\mu\mu$ für Trog I
0	0,5752	0,5738	0,2164
40	0,4979	0,5107	
80	0,4451	0,4735	0,1551
120	0,3991	0,4316	0,1451
Ganz gebleicht	0,3031	0,3042	

Versuch XVIII. Kaninchensehpurpur 30. VII. 03 p. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 474 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 474 $\mu\mu$ für Trog I	Absorptionswerte bei 474 $\mu\mu$ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 $\mu\mu$ für Trog I
0	0,5666	0,5653	0,1765
40	0,5160	0,5307	
80	0,4696	0,4901	0,1417
120	0,4188	0,4398	0,1340
Ganz gebleicht	0,3261	0,3238	

Versuch XIX. Kaninchensehpurpur 10. VIII. 03 p. m.
Bleichlichter 589 $\mu\mu$ (Trog I) und 459 $\mu\mu$ (Trog II).

Zeit nach Beginn der Belichtung in Minuten	Absorptionswerte bei 509 $\mu\mu$ für Trog I	Absorptionswerte bei 509 $\mu\mu$ für Trog II	Absorptionswerte bei 589 $\mu\mu$ für Trog I	Absorptionswerte bei 459 $\mu\mu$ für Trog II
0	0,5814	0,5776	0,1717	0,4942
60	0,4783	0,5575	0,1619	0,4815
120	0,4068	0,5253	0,1429	0,4362
Ganz gebleicht	0,2819	0,2731		

Es wäre natürlich wünschenswert gewesen, die Werte für die Bleichungsgeschwindigkeiten auf streng rechnerischem Wege aus den Beobachtungen herzuleiten (vgl. die Schlufsbemerkungen); hier aber glaubten wir, ein einfacheres Verfahren einschlagen zu müssen, welches besonders gelegentliche kleine Unregelmäfsigkeiten im Kurvenverlauf zweckmäfsiger erscheinen liefs. Es wurden nach den in Stab 2 und 3 stehenden Absorptionswerten für beide Lösungen auf Millimeterpapier in geeignetem Mafsstab Kurven gezeichnet, welche die Absorptionsänderung in der Zeit darstellen. An diesen Kurven wurden die Zeiten (Abszissen) gemessen, nach welchen beide Lösungen gleiche Absorption aufwiesen; der reziproke Wert gab die Bleichungsgeschwindigkeiten, welche für diejenige im Natriumlicht = 1 angegeben werden. Für die ersten $1^1/_2$ Stunden des Kurvenverlaufs der Natriumbleichung wurden etwa 6 solche Bestimmungen an verschiedenen Stellen ausgeführt und aus allen der Mittelwert genommen. Damit war das Verhältnis der

mittleren Bleichungsgeschwindigkeiten gegeben, im Anhang unter „unkorrigierter Mittelwert“ aufgeführt. Beträgt dieser z. B. für die Wellenlängen 589 $\mu\mu$ und 530 $\mu\mu$ 1 : 2,9, so ist damit gesagt, dafs die durchschnittliche Bleichungsgeschwindigkeit im Licht von 530 $\mu\mu$ das 2,9fache von der im Natriumlicht beträgt.

Die Gründe, wegen derer die so gefundenen Zahlenverhältnisse noch einer Umrechnung bedürfen, wurden zum Teil schon angedeutet, und sind hier besonders in Beziehung auf die Verhältnisse im menschlichen Auge näher auszuführen. Für den hier beabsichtigten Vergleich zwischen Bleichungswerten und Dämmerungswerten würde die Umrechnung der ersteren auf unendlich dünne Sehpurpurschicht nur dann ganz entsprechend sein, wenn auch im Auge die von einem Lichtstrahl durchsetzte Sehpurpurmenge (Schichtdicke $\times$ Konzentration) als unendlich klein bezeichnet werden könnte. Dies ist nun jedenfalls bei hochgradiger Dunkeladaptation nicht der Fall; hier mufs vielmehr, wie erwähnt, der gröfsere Sehpurpurgehalt in bestimmter Richtung von Einflufs auf das Sehen des dunkeladaptierten Auges sein. Von grofsem Interesse sind hier Versuche, durch welche in Bestätigung der theoretischen Erwartungen eine Änderung der Dämmerungswerte im Adaptationsverlauf tatsächlich festgestellt wurde. Stegmann (6) stellte unter den Bedingungen des Dämmerungssehens Gleichungen ein, beispielsweise zwischen einer orangefarbigen Umgebung und einem blaugrünen Fleck (480 $\mu\mu$). Wurden die Einstellungen bei einem geringen Adaptationsgrad begonnen und von Zeit zu Zeit wiederholt, so mufste die Menge des blaugrünen Lichts merklich vermehrt werden, um die Dämmerungsgleichung mit dem Orange aufrecht zu erhalten. Vom Standpunkt der v. Kriesschen Theorie ist die Erscheinung leicht erklärlich. Sie fafst die zunehmende Adaptation im wesentlichen als Folge des zunehmenden Purpurgehalts der Stäbchen auf. Da das blaugrüne Licht stärker absorbiert wird, wie das orangefarbige, dessen Absorption im Sehpurpur sehr gering ist, wird bei zunehmender Sehpurpurkonzentration die mittlere einwirkende Lichtstärke für das Blaugrün erheblich stärker verringert, wie für das Orange, so dafs der Dämmerungswert des ersteren dem des Orange gegenüber verkleinert wird. Man kann zur Vereinfachung annehmen, dafs die Absorption im Orange verschwindend klein ist, im Vergleich zu der im Blau-

grün; dann wird der Konzentrationsgrad des Sehpurpurs ohne Einflufs sein auf den Dämmerungswert des Orange. Unter dieser Näherungsannahme kann man aus den Werten der Tabelle II der zitierten Arbeit berechnen, dafs die Dämmerungswerte des blaugrünen Lichts sich am Anfang und am Ende der Versuche durchschnittlich verhalten wie 1 : 0,75. Die mittlere einwirkende Lichtmenge ging also auch im Verlauf des Versuchs von 1 auf 0,75 zurück. Diese Überschlagsberechnung möge zeigen, dafs der Einflufs der Sehpurpurkonzentration im Auge wenigstens bei hochgradiger Dunkeladaptation aller Wahrscheinlichkeit nach keineswegs unterschätzt werden darf. Da dennoch im folgenden die Umrechnung der Bleichungswerte auf unendlich dünne Schicht vorgenommen wurde, ist im Auge zu behalten, dafs dies eher eine Überkorrektion bedeutet.

Bei der Umrechnung genügt es nicht, für den Beginn des Versuchs die der durchgelassenen Lichtmenge entsprechende mittlere einwirkende Lichtstärke zu bestimmen. Denn diese nimmt, wie oben schon angedeutet wurde, im Verlauf der Bleichung zu. Die Sehpurpurlösung werde durch ein Licht von 530 $\mu\mu$ Wellenlänge gebleicht; die Absorption betrage zu Anfang 0,6; dann wird von der auffallenden Lichtmenge 1 nur 0,4 die Lösung verlassen. Während also die Seite der Lösung, welche der Lichtquelle zugekehrt ist, von der Lichtmenge 1 gebleicht wird, wirkt auf die Schicht an der Austrittsstelle nur 0,4 derselben Lichtmenge ein. Die durchschnittlich einwirkende Lichtmenge beträgt dabei etwa 0,65. Nach 1stündiger Bleichung betrage die Lichtabsorption nur noch 0,4, die durchgelassene Lichtmenge wäre also 0,6, die durchschnittlich einwirkende Lichtmenge ungefähr 0,78 von der gesamten auffallenden. (Der Lichtverlust durch Reflexion bleibt hier unberücksichtigt.) Trotz konstanter Lichtquelle nimmt also die Belichtungsstärke während eines Versuches zu, sobald die Bleichung an einer Schicht von endlicher Dicke ausgeführt wird. Um diesen Einflufs durch Rechnung zu beseitigen, wurde zunächst aus den Absorptionswerten des Anfangs der Versuche die mittlere einwirkende Lichtstärke berechnet (nach obiger Formel $c = \frac{1-\delta}{ln\ \delta}$, wobei δ die von endlicher Schicht durchgelassene Lichtmenge, c die mittlere einwirkende Lichtmenge bedeutet), dann dasselbe für denjenigen Absorptionswert, der am Ende der zur Ausrechnung benutzten

Kurvenstrecke gültig war. Aus den beiden für die mittlere einwirkende Lichtstärke gefundenen Werten, den für den Versuchsanfang und den für bestimmte spätere Zeit gültigen, wurde das Mittel genommen und definitiv der Umrechnung zugrunde gelegt. Diese Rechnungen wurden für die Lösung, welche im Natriumlicht und die, welche im kurzwelligeren Licht bleichte, getrennt ausgeführt. Die Umrechnungen sind in den Tabellen des Anhangs enthalten.

Nachfolgende Tabelle I enthält eine Zusammenstellung der korrigierten Werte, nach den bleichenden Lichtern geordnet, sowie die Mittelzahlen. Wie ersichtlich, sind die einzelnen Werte durch einen trennenden Strich in zwei Gruppen geteilt; hierfür war der Umstand mafsgebend, dafs nur ein Teil der Werte, und zwar die über dem Strich befindlichen, für die gleiche Nernstlampe festgestellt werden konnte, wie die Dämmerungswerte,

Tabelle I.

Zusammenstellung der Bleichungswerte des Nernstlicht-Dispersionsspektrum für Kaninchensehpurpur.

Wellenlänge	589 μμ	542 μμ	530 μμ	519 μμ	509 μμ	491 μμ	474 μμ	459 μμ
Einzelwerte	1	3,30	3,46	3,48 a	2,75 b	1,845 c	1,00 d	0,299 e
	1	3,51 g	3,60	3,13 a	3,10 b	1,54 c	0,95 d	
	1		3,80 g	3,89 g	3,29 f	1,68 f		
	1			3,30 e	3,20 e			
Mittelwerte	**1**	**3,40**	**3,62**	**3,45**	**3,09**	**1,69**	**0,975**	**0,299**
Mittelwerte der mit Nernstlampe I angestellten Versuche	1	3,30	3,53	3,31	2,93	1,69		
Mittelwerte der mit Nernstlampe II angestellten Versuche	1	3,51	3,80	3,60	3,25	1,68	0,975	0,299

Anm.: Die mit gleicher Lösung angestellten Versuche sind mit gleichen Buchstaben (a, b, c etc.) bezeichnet.

Die mit Nernstlampe I angestellten Versuche (gleiche Lampe wie bei den Dämmerungswerten) stehen über dem starken Strich.

weil das Stäbchen der Nernstlampe infolge längerer Benützung sprang. Da nicht gewifs ist, ob die andere Lampe qualitativ genau gleich brannte, nahm ich diese Trennung der Werte vor, um so mehr, als die mit der letzteren Lampe festgestellten im allgemeinen etwas höher sind, als die vorigen. So finden die Abweichungen der für die einzelnen Wellenlängen gültigen Werte wohl zum Teil eine Erklärung. In der Tabelle sind ferner noch unter den Zahlenwerten Buchstaben angebracht; sie bezeichnen die Versuche, bei welchen die verwendeten Lösungen der gleichen Stammlösung entnommen werden konnten. Nicht besonders bezeichnete Werte wurden in Versuchen gewonnen, bei welchen die Lösung nur zu einem Bleichungsversuch verwendet wurde.

III. Dämmerungswerte für das Dispersionsspektrum des Nernstlichts.

Wie schon in der Einleitung erwähnt, waren die im vorhergehenden ermittelten Bleichungswerte mit den sogenannten Dämmerungswerten, den Reizwerten des farblos gesehenen lichtschwachen Spektrum für das dunkeladaptierte Auge, in Parallele zu setzen. Obwohl in letzter Zeit mehrere sehr genaue Bestimmungen dieser Werte ausgeführt wurden, konnten die schon vorliegenden Messungen doch nicht zum Vergleich mit den Bleichungsverhältnissen des Sehpurpurs herangezogen werden, weil erstere vorwiegend für das Gaslicht sowie Sonnen- und Himmelslicht bestimmt wurden, letztere für das Licht der Nernstlampe ermittelt werden mufsten, da das Gaslichtspektrum nicht intensiv genug war. Am Spektrum des Nernstlichts sind zwar kürzlich von physikalischer Seite Bestimmungen von Reizschwellen gemacht worden; es kann aber kein Zweifel darüber bestehen, dafs diese Feststellung der „Farbenempfindlichkeit des Auges“ keine für vorliegenden Zweck brauchbaren Resultate enthält. A. Pflüger (10) bestimmte im wesentlichen wohl Dämmerungswerte, um mich auch hier bekannter kurzer Bezeichnungen zu bedienen; das geht aus den näheren Angaben seiner Versuchsbedingungen hervor. Die Ergebnisse sind aber, soweit sie physiologische Fragen betreffen, mit wohlbekannten Feststellungen der neueren Zeit zu wenig vereinbar, als dafs sie hier in Betracht kommen könnten. (Der rein physikalische Teil

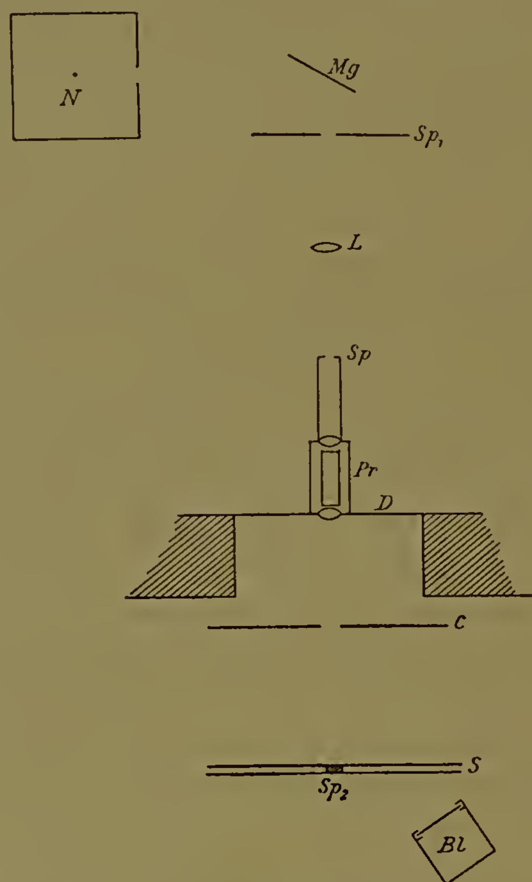
der Untersuchung, die Feststellung der Energieverteilung im Nernstspektrum, bleibt selbstverständlich hiervon unberührt.)

Zur Ermittlung der Dämmerungswerte des Nernstlichts hätte für vorliegenden Zweck ein indirekter Weg eingeschlagen werden können, nämlich die Berechnung aus den bekannten Dämmerungswerten des Sonnenlichts (Schaternikoff) unter Berücksichtigung der Energieverteilung im Sonnenlicht (Langley) und im Spektrum des Nernstlichts (A. Pflüger). Es empfahl sich aber aus folgenden Gründen eine direkte Bestimmung der Dämmerungswerte des Nernstlichts. Es ist nicht nur erforderlich, dafs Dämmerungswerte und Bleichungswerte der einzelnen Lichter für die Sehpurpurlösung am Spektrum der gleichen Lichtart festgestellt sind, sondern auch unter möglichst den gleichen sonstigen Versuchsbedingungen. Es kommt hier vor allem die Reinheit des Spektrum in Betracht, welche bei den Bleichungsversuchen nicht so grofs genommen werden konnte, wie sie für exakte Dämmerungsbestimmungen wenigstens im mittleren Spektralbereich zu verlangen ist. Bei der vorwiegend üblichen Methode des Flecks, des konstanten Vergleichslichts und der Einstellung durch Breitenänderung des das Spektrum liefernden Spaltes ist die Reinheit des Spektrum, welche von der Spaltbreite abhängt, bei den Einstellungen an den einzelnen spektralen Orten nicht gleich, sondern um so gröfser, je höher der Dämmerungswert der betreffenden Lichtart ist. Es ist leicht ersichtlich, dafs der Gipfelpunkt der Kurve niedriger liegt, wenn er mit weniger reinem Spektrum bestimmt wird, denn zu demjenigen homogenen Licht, welches den höchsten Dämmerungswert hat, sind Lichter von niedrigerem Dämmerungswert beigemischt. Die Bleichungswerte der einzelnen Lichter wurden nun, wie aus dem vorigen Abschnitt hervorgeht, bei konstanter nicht zu geringer Spaltweite bestimmt, also bei stets gleicher Reinheit bzw. Unreinheit des Spektrum. Deshalb war erforderlich, die Dämmerungswerte ebenfalls bei konstanter Spaltweite und zwar bei der gleichen, wie die Bleichungswerte, an möglichst derselben Versuchseinrichtung festzustellen. Den theoretischen Vorstellungen gemäfs wäre es weiter am richtigsten gewesen, die Dämmerungswerte für einen möglichst geringen Adaptationsgrad, bei welchem die Konzentration bzw. Schichtdicke des Sehpurpurs im Auge als minimal angesehen werden kann, festzustellen, weil ja auch die Bleichungswerte für unendlich dünne Schicht anzugeben waren. Doch wurde auf diese

weitere Annäherung verzichtet und die Bestimmung bei mittlerem Adaptationszustand ausgeführt, wodurch die Genauigkeit der Einstellungen gewann.

Die Anordnung für die Bestimmung der Dämmerungswerte war folgende. (Fig. 2.) Der gradsichtige Spektral-

Fig. 2.
Versuchsanordnung für die Bestimmung der Dämmerungswerte.



(*N* ist von *Mg* 3,55 Meter entfernt; der Raumersparnis halber näher gezeichnet.)
Mafsstab 1 : 30.

apparat mit dem Prisma *Pr* und dem Spalt *Sp* war ebenso wie vorher in das zwischen zwei Zimmern befindliche Diaphragma *D* lichtdicht eingeschlossen. Ein Magnesiumoxydschirm *Mg* reflektierte das Licht der Nernstlampe *N* (ohne Mattglocke) durch einen in schwarzen Karton eingeschnittenen Spalt von 1,8 mm Breite (Sp_1) auf die Linse *L*, welche das Bild jenes erleuchteten Spaltes Sp_1 auf den Spalt *Sp* entwarf, so, dafs die Ränder des Bildes von Sp_1 die Ränder von *Sp* noch etwas überragten. Der

Spalt *Sp* war 0,36 mm breit, ebenso wie bei den Bleichungsversuchen; seine Bildprojektion in der Ebene der Skala *S* hatte also wieder eine Breite von 1,8 mm. Das Spektrum, dessen Breite zwischen 589 $\mu\mu$ und 446 $\mu\mu$ wiederum 69,6 mm betrug, wurde jenseits des Diaphragmas *D* in der Ebene jener Skala *S* entworfen, auf welcher ein senkrechter Spalt Sp_2 von 1,2 mm Breite verschiebbar war; zwischen ihm und dem Spektralapparat befand sich ein verschiebbares Kartonblatt *C* mit kreisrunder Öffnung, durch welche man, je nach der Stellung des Spaltes Sp_2 die Linse des Spektralapparats von (annähernd) homogenem Licht bestimmter Wellenlänge erleuchtet sah. Der Karton *C* konnte durch eine Irisblendenlampe *Bl* in verschiedener Stärke beleuchtet werden. Diese Lampe bestand aus einer in Blechkasten eingeschlossenen Glühlampe, welche eine in der einen Wand des Kastens befindliche Milchglasscheibe beleuchtete. Vor derselben befand sich eine Irisblende. Die Lichtstärke der beleuchteten Milchglasscheibe mufste durch einige zwischengeschobene Papierblätter herabgesetzt werden. Da die auf den Karton *C* fallende Lichtmenge dem Inhalt der beleuchteten Milchglasfläche direkt proportional ist, konnten aus diesem die relativen Dämmerungswerte berechnet werden. Eine Hauptabweichung dieser Einrichtung von der für die Bleichungsversuche beschriebenen besteht zunächst darin, dafs der bei den Dämmerungswertbestimmungen benutzte Spalt Sp_2 nicht die gleiche Breite besitzt wie die für die Sehpurpurlösung verwendeten Tröge (1,2 mm gegen 4 mm), dafs also auf das Auge mit gröfserer Annäherung homogenes Licht einwirkte, als auf die Sehpurpurlösung der Bleichungsversuche. Bei letzteren war es aus technischen Gründen nicht möglich, schmälere Tröge zu verwenden; die Dämmerungswerte aber mit einem Okularspalt von 4 mm Breite vorzunehmen, wurde schon deshalb unterlassen, weil der Pupillarrand leicht einen Teil des auffallenden Lichtes abgeblendet hätte, und die erwünschte Übereinstimmung doch nicht erzielt worden wäre. Eine weitere Abweichung liegt in der Unmöglichkeit, die Dämmerungswerte mit dem Spektrum des direkten Nernstlichts, selbst bei eingeschaltetem Episkotister, aufzunehmen. Die Einschaltung der Magnesiumoxydfläche schien die beste Gewähr zu bieten, dafs bei verminderter Intensität die Qualität des Lichtes der Nernstlampe unverändert blieb. Die Nernstlampe war in einer Entfernung von 3,55 Meter von der Magnesiumfläche auf-

gestellt, und von einem Pappgehäuse lichtdicht umgeben; in der dem Magnesiumschirm zugewandten Fläche befand sich eine kreisrunde Blende von 11 mm Durchmesser. Durch diese wurde eine weitere Herabsetzung der Intensität in der Art bewirkt, dafs der obere und untere Teil des leuchtenden Stäbchens abgeblendet wurde, und nur der mittlere als Lichtquelle diente. Die feinere Einstellung der Lichtstärke, für welche Farblosigkeit des Spektrum für das dunkeladaptierte Auge mafsgebend sein mufste, konnte leicht durch Drehung der Magnesiumfläche um ihre senkrechte Achse bewirkt werden. Die Einstellungen auf Helligkeitsgleichheit von Fleck und Umgebung erfolgten durch Variierung der Weite der Irisblende; vor und nach drei Einstellungen für ein bestimmtes Licht wurden drei Einstellungen für 589 $\mu\mu$ gemacht und die Dämmerungswerte auf *Na* = 1 bezogen. Die erhaltenen Werte sowie die Gesamtmittelwerte sind in der folgenden Tabelle II enthalten. Es ist dabei zu erwähnen, dafs die horizontal nebeneinanderstehenden Werte nicht stets der gleichen Versuchsreihe angehören. Da für jeden einzelnen Wert der Dämmerungswert des Natriumlichts in der erwähnten Weise bestimmt war und

Tabelle II.

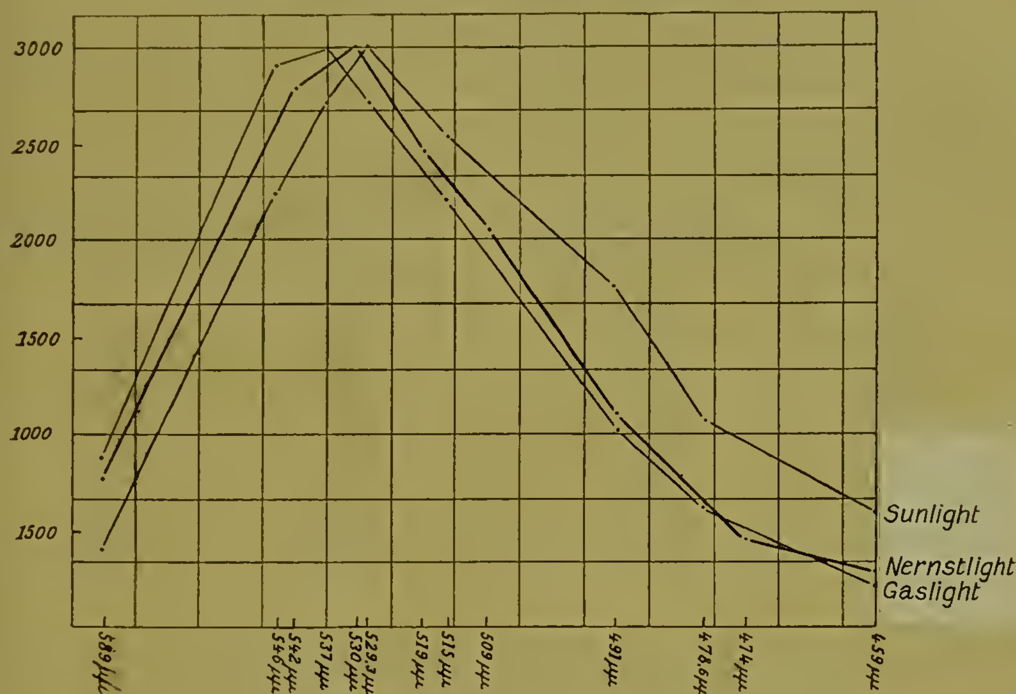
Dämmerungswerte des Nernstlicht-Spektrum, bezogen auf *DW* (589 $\mu\mu$) = 1.

589 $\mu\mu$	542 $\mu\mu$	530 $\mu\mu$	519 $\mu\mu$	509 $\mu\mu$	491 $\mu\mu$	474 $\mu\mu$	459 $\mu\mu$
1	3,90	3,70	3,00	2,74	1,59	0,591	0,337
1	3,39	4,18	3,10	2,68	1,59	0,562	0,335
1	3,39	3,82	3,57	2,89	1,30	0,643	0,334
1	3,63	4,20	3,25	2,72	1,49	0,610	0,367
1	3,61	4,32	3,11	2,81	1,29	0,591	0,378
1	3,70	4,26	2,90	2,76	1,47	0,615	0,347
1	3,67	3,76	3,19	2,75	1,32	0,599	0,371
1	3,33	4,13	3,17	2,39	1,55	0,564	0,300
1	3,26	3,77	3,26	2,34	1,34	0,608	0,350
1	3,85	3,09	3,21	2,59	1,28	0,556	0,329
1	3,83	3,62				0,629	0,342
1	3,69	4,18				0,624	0,361
1	3,81	4,16				0,647	
1		3,63				0,723	
1						0,677	
1						0,702	
Mittelwerte:							
1	3,62	3,91	3,18	2,67	1,42	0,621	0,346

für alle Versuchsreihen die gleichen Bedingungen genau eingehalten wurden, ist ein Auseinanderhalten der einzelnen Werte nach den Versuchsreihen ohne Interesse. In Figur 3 sind die hier erhaltenen Dämmerungswerte für das Spektrum des Nernstlichts mit den von Schaternikoff für das Sonnenlicht und Gaslicht ermittelten zusammengestellt.

Fig. 3.

Dämmerungswerte für das Dispersionsspektrum des Sonnenlichts und Gaslichts (beides nach Schaternikoff) sowie des Nernstlichts, berechnet auf gleiche maximale Höhe.



Aus den Schaternikoffschen Zahlen entnahm ich die Dämmerungswerte der Lichter, welche in der Nähe derjenigen liegen, für welche ich die Dämmerungswerte des Nernstlichtspektrum bestimmte. Um die Kurven auf gleichen Maſsstab zurückzuführen, wurde ferner bei jeder der höchste Wert zu 3000 angenommen, und die übrigen Werte im Verhältnis 3000 : x umgerechnet (vergröſsert bzw. verkleinert), wo x der unmittelbar gefundene höchste Wert bedeutet. Tabelle III gibt die umgerechneten Werte für das Sonnenlicht nach Schaternikoff, und für das Nernstlicht. Wie zu erwarten, nahmen die letzteren eine mittlere Stellung ein, im langwelligen Spektralteil sind sie gröſser als die Dämmerungswerte des Sonnenlichts, kleiner wie die des Gaslichts, während im kurzwelligen Teil das umgekehrte statt

hat. Natürlich darf hier nicht vergessen werden, dafs die Dämmerungswerte des Nernstlichts mit anderer bei vorliegendem Vergleich ungenauerer Methode aufgenommen wurden. Auch möchte ich darauf hinweisen, dafs nur die Dämmerungswerte der Lichter festgestellt wurden, welche für die Bleichungsversuche in Betracht kamen.

Tabelle III.

a) Dämmerungswerte für das Dispersionsspektrum des Sonnenlichts nach SCHATERNIKOFF, berechnet für *DW.* (529,3 $\mu\mu$) = 3000.

b) Dämmerungswerte für das Dispersionsspektrum des Nernstlichts, berechnet für *DW.* (530 $\mu\mu$) = 3000. (Die Werte für Gaslicht sind unmittelbar der SCHATERNIKOFFschen Tabelle I zu entnehmen.)

a)

Wellenlänge $\mu\mu$	Sonnenlicht Dämmerungswerte
589,3	410,7
546,0	2278
537,2	2684
529,3	3000
515,4	2535
490,[illegible]	1731
478,6	1078
458,7	588,7

b)

Wellenlänge $\mu\mu$	Nernstlicht Dämmerungswerte
589,3	767
542	2777
530	3000
519	2440
509	2049
491	1089,5
474	476,5
459	265,5

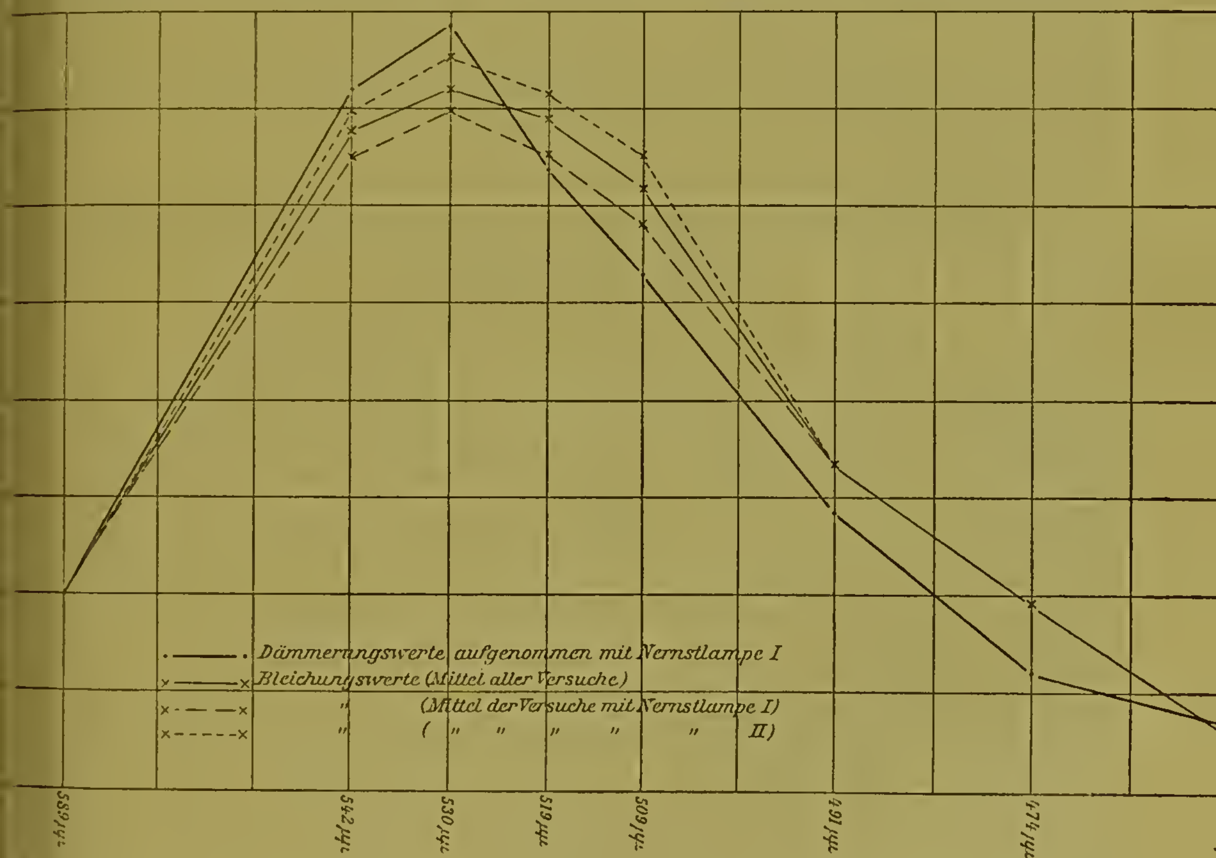
IV. Vergleich der bleichenden Wirkung spektraler Lichter mit ihren Dämmerungswerten.

Die Resultate der beiden vorigen Abschnitte sind in den Kurven der Fig. 4 zusammengefafst. Als Abszisse ist das Spektrum zugrunde gelegt, als Ordinaten sind die Verhältniszahlen der korrigierten Bleichungswerte bzw. der Dämmerungswerte aufgetragen, wobei in der erwähnten Weise die Werte für das Natriumlicht des Spektrum = 1 gesetzt wurden. Von den Bleichungswerten wurden nicht nur die Gesamtmittelwerte eingezeichnet (mittlere Kurve), sondern auch die Mittelzahlen der mit den beiden verschiedenen Nernstlampen bestimmten Werte für sich gesondert, wofür der Grund schon oben angegeben wurde.

Über den Kurvenverlauf der Bleichungswerte verglichen mit dem der Dämmerungswerte ist folgendes hervorzuheben.

Während die Bleichungswerte bei 542 $\mu\mu$ und 530 $\mu\mu$ etwas kleiner sind, wie die Dämmerungswerte, erhebt sich im kurzwelligen Spektralteil die Bleichungskurve etwas über die Dämmerungskurve. Betreffs des ersteren Teils ist daran zu erinnern, dafs die Bleichungswerte insofern für unreineres Spektrum bestimmt wurden, als die Trogbreite (dgl. Breite des Lummerschen Flecks) ca. 4 mm, betrug, während der Okularspalt bei den Dämmerungswerten nur 1,2 mm breit war. Bei 530 $\mu\mu$ wurde also nicht streng genommen die Einwirkung nur dieses Lichtes festgestellt, sondern vielmehr die mittlere Einwirkung eines

Fig. 4.
Zusammenstellung der Bleichungswerte des Nernstlichtspektrum (für Kaninchensehpurpur) mit den Dämmerungswerten desselben Lichts.



zwischen 528 $\mu\mu$ und 532 $\mu\mu$ liegenden Spektralbereiches. Notwendig mufs sich dabei eine Abflachung des Kurvengipfels ergeben; kommen doch zu dem Licht von starker Bleichwirkung Lichter von geringerer Bleichkraft hinzu. Wäre es möglich gewesen, mit schmaleren Trögen und kleinerem Lummerschen Fleck zu arbeiten, und dadurch die Übereinstimmung mit der

Anordnung der Dämmerungswerte zu vergröfsern, so hätte der Gipfel der Bleichungskurve nur höher ausfallen können. Für den absteigenden Teil der Kurve ist hervorzuheben, dafs hier die Überkorrektion durch Berechnung auf unendlich dünne Schicht weit stärker in die Wage fällt, wie im langwelligen Teil, weil das Absorptionsmaximum in der Nähe von 509 $\mu\mu$ liegt. Wenn es möglich wäre, für die dem Auge entsprechende Schichtdicke zu reduzieren, so würden diese Werte niedriger ausfallen, und es würde damit eine weitere Annäherung an die Dämmerungswerte eintreten.

Im Ganzen ist es berechtigt, in den bisher mitgeteilten Versuchen eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Voraussetzungen zu erblicken. Es hat sich gezeigt, dafs die bleichende Wirkung spektraler Lichter auf den Sehpurpur der Wirkung derselben auf das Auge unter den Bedingungen des Dämmerungssehens mit Annäherung proportional verläuft.

V. Absorption des Sehpurpurs, absorbierte Energiemengen und Dämmerungswerte.

a) Zur Darstellung des Sehpurpurs.

Wenn auch im folgenden keine neuen Beiträge zur Sehpurpurdarstellung gegeben werden können, so ist doch eine genauere Erörterung schon deshalb notwendig, weil auch frühere Untersucher mit den von Kühne gegebenen Vorschriften nicht für alle Anforderungen genügende Resultate erzielen konnten. Nur nach genauer Kenntnis der Mängel der vorliegenden Methoden — oder jedenfalls der Schwierigkeit ihrer Handhabung, um nicht der Autorität Kühnes vorzugreifen, — kann es möglich sein, Gesichtspunkte für eine zukünftige Verbesserung zu gewinnen.

Eine gröfsere Anzahl vorläufiger Bleichungsversuche und Absorptionsbestimmungen wurde am Froschsehpurpur angestellt. Für diesen stehen zwei Darstellungsmethoden nach Kühne zur Verfügung, welche ich in der von mir verwendeten Art kurz angeben möchte. Methode I. ca. 25 Dunkelfrösche, die im Warmen gehalten sind, werden bei rotem Licht durch Rückenmarkzerstörung (Entblutung!) getötet, die Augen herausgenommen, gut in Kochsalzlösung gewaschen, halbiert, die Netzhäute möglichst pigmentfrei herausgenommen, in Gallenlösung von 2 % eingelegt.

Nach einiger Zeit wird die Flüssigkeit filtriert und zentrifugiert, vom Rückstand abgehoben und über Schwefelsäure in der Wasserstrahlluftpumpe eingetrocknet und zwar in 3 gleichen Portionen. Wurde jede darauf in ca. $^3/_4$ ccm Wasser gelöst, so wurden Lösungen erhalten von einer für Absorptionsbestimmungen und Bleichungsversuche passenden Konzentration. Auch diese Lösung wurde zur Vorsicht zentrifugiert. Stets wurden hierdurch vollkommen klare Lösungen erhalten; Trübungen traten während der Versuche nicht ein, so dafs von besonderen konservierenden Zusätzen abgesehen werden konnte. Die Lösungen sind nicht nur stets frei von Trübungen, sondern auch von Blut, wie die spektroskopische Untersuchung ergab. Hingegen zeigen sie stets nach der Ausbleichung eine mehr oder weniger starke gelbliche Färbung. Das Präparat von „Natr. glykochol. puriss.“ wurde von der Firma G. Grübler geliefert; es liefs in Substanz und in Lösungen mit blofsem Auge keine Färbung erkennen.

Um die Sehpurpurlösungen besonders von Blutbeimengungen zu reinigen wurde von Kühne (9) für Froschsehpurpur die Magnesiumsulfatmethode angegeben (Methode II). Die nach I gewonnene nach dem ersten Zentrifugieren abgehobene Lösung wird mit reichlich überschüssigem Magnesiumsulfat gesättigt, der Niederschlag mit gesättigter Magnesiumsulfatlösung gespült und in Wasser gelöst. Wenn auch diese Lösungen ohne nennenswerten farbigen Rückstand ausbleichen, so ist ihre Brauchbarkeit dadurch beeinträchtigt, dafs sie den Sehpurpur sehr wenig konzentriert enthalten. Verfährt man zu sparsam mit dem Überschufs des Magnesiumsulfats, so mifslingt die Darstellung leicht gänzlich.

Für Sehpurpur von Kaninchen u. a. gab Kühne (9) die Alaunmethode an (Methode III). Lösungen geeigneter Konzentration erhielt ich folgendermafsen. Drei, mehrere Stunden im Dunkeln gehaltene Kaninchen werden bei rotem Licht durch Enthaupten getötet (Entblutung!), die Augen enukleiert, am Kornealrand „halbiert“, der Glaskörper vorsichtig durch Druck entfernt. Die hinteren Bulbusabschnitte werden auf 3—4 Stunden in Alaunlösung von 4 % gelegt, die Netzhäute darauf von der Chorioidea abgehoben, am Sehnerveneintritt abgeschnitten und 1 Stunde in einmal gewechseltes Wasser gelegt, worauf sie für ca. 2 Stunden in Kochsalzlösung von 10 % gebracht werden. Nach Abtropfenlassen werden die Netzhäute in ca. 3 ccm 4 % Gallenlösung gebracht, mit Glasstab zerrieben, die Lösung filtriert,

zentrifugiert und zusammen über Schwefelsäure eingetrocknet. Durch Auflösen in ($^3/_4$—)1 ccm Wasser und nochmaliges Zentrifugieren wurden völlig klare Lösungen geeigneter Konzentration erhalten, welche sich längere Zeit klar hielten, so dafs sie zu mehreren Versuchen verwandt werden konnten. Die Lösungen waren stets frei von Blut, waren hingegen ebenfalls nach dem Ausbleichen wenig gelblich gefärbt. Es gelang mir nicht, das Ergebnis Kühnes, völlig farblose Rester, zu erzielen. Köttgen und Abelsdorff scheinen hierin nicht wesentlich glücklicher gewesen zu sein; sie geben an, mit der späteren Methode Kühnes (III) keine wesentlich anderen Resultate erzielt zu haben, wie mit der früheren (I). In einem Falle konnten sie mittels eines Kühneschen Gallenpräparates eine nach Ausbleichen farblose Lösung erzielen.

b) Die Methode der Absorptionsbestimmungen war hier im wesentlichen die gleiche, wie sie schon bei den Bleichungsversuchen beschrieben wurde. Es wurden wieder erst 3 Einstellungen ohne Lösung, sodann 3 mit vorgeschobener Lösung und schliefslich wieder 3 ohne Lösung vorgenommen; aus den Mittelzahlen wurde die Absorption bestimmt. Nachdem diese Einstellungen für eine Reihe von Spektralfarben gemacht waren, wurden sie in umgekehrter Reihenfolge nochmals ausgeführt und nun das Mittel beider Versuchsreihen der weiteren Berechnung zugrunde gelegt. Nachdem die Lösung am Sonnen-, Tages- oder direkten Nernstlicht völlig gebleicht war, wurde wiederum in einer Doppelreihe der beschriebenen Art die Lichtabsorption bestimmt und ihr Mittelwert genommen. Aus den Absorptionswerten vor der Bleichung und nach der Bleichung waren weiter die Werte für Purpur-allein unter der Voraussetzung zu berechnen, dafs der gefärbte Rest ein dem Sehpurpur fremder Bestandteil ist. Die Werte für Purpur-allein ergeben sich aus dem Verhältnis der durchgelassenen Lichtmengen vor und nach der Bleichung.

Hier sei noch erwähnt, dafs zwischen den Absorptionswerten der Hinweg- und der Rückwegbestimmungen keine regelmäfsigen Unterschiede in dem Sinne vorkamen, dafs im Lauf der Absorptionsbestimmungen eine störende Bleichung stattgefunden hätte. Es ist also bei den für die Bleichungsversuche vorgenommenen Absorptionsbestimmungen eine fehlerhafte, während

der letzteren Bestimmungen erfolgende Bleichung um so weniger eingetreten, als dort die Absorptionsbestimmungen weniger zahlreich zu sein brauchten.

c) Absorptionsbestimmungen.

1. Natur des gelblichen Restes.

Für eine Verbesserung der Methoden der Sehpurpurdarstellung wäre es wichtig, näheres über die Herkunft und Art des lichtbeständigen gelben Farbstoffes zu wissen, der in den gebleichten Lösungen enthalten zu sein pflegt. Es seien einige Bemerkungen darüber gestattet, wenn auch einstweilen ein abschliefsendes Urteil noch nicht möglich ist. Es wäre natürlich irrtümlich, den gelblichen Restfarbstoff mit dem Kühneschen „Sehgelb" zu identifizieren, denn dieses soll ein Zwischen- nicht ein Endprodukt der Sehpurpurbleichung sein. Trotzdem ist von vornherein die Möglichkeit nicht zu leugnen, dafs die bleibende Gelbfärbung zum Teil wenigstens aus Bleichungsprodukten des Sehpurpurs besteht, wenn auch dagegen schon der Umstand spricht, dafs es gelegentlich gelang, nach Bleichung farblose Lösungen zu erzielen. Ferner scheint mir gegen diese Möglichkeit eine Feststellung von Köttgen und Abelsdorff (5) zu sprechen, welche im folgenden noch näher erörtert werden soll. Bestimmten sie die Absorption von ungebleichten sowie von partiell gebleichten Lösungen und rechneten sie aus den Werten unter Abzug der Restabsorption der völlig gebleichten Lösungen die Absorption für den Purpur allein aus, so fanden sie Kurven, in welchen lediglich Konzentrationsunterschiede ausgesprochen waren. Wäre in dem gebleichten Rest ein gefärbtes Endprodukt der Sehpurpurbleichung enthalten, so wäre wohl unerklärlich, wie auf Grund einer, unter der gemachten Voraussetzung falschen Berechnung ein derartig gesetzmäfsiges Verhalten resultieren könnte. Ferner müfste sich, wenn die Färbung des gebleichten Restes aus dem Sehpurpur der Lösung stammt, ein regelmäfsiger Zusammenhang zwischen der Konzentration der ungebleichten Lösung und der Intensität der Restfärbung ergeben; dies läfst sich aus meinen Versuchen nicht entnehmen. Folgende Zahlen von Lösungen (Kaninchensehpurpur), von denen jede einer anderen Stammlösung entnommen ist, seien angeführt; die Absorptionswerte beziehen sich auf die Wellenlänge 507 $\mu\mu$:

Absorptionswerte	
Ungebleicht	Gebleicht
0,5614	0,2704
0,6521	0,3014
0,6603	0,2781
0,6651	0,3179

Auch aus den Absorptionsbestimmungen, welche den Bleichungsversuchen zugrunde liegen, ist keine feste Beziehung zwischen Sehpurpurgehalt der Lösung und Intensität der Restfärbung zu entnehmen. So scheint diese auf nicht spezifischen Beimengungen zu beruhen. Sicher ist zunächst, dafs es auch mit der einfachen Methode Kühnes (I) leicht gelingt, blutfreie Lösungen zu erhalten, wenigstens konnte ich spektrophotometrisch niemals die Gegenwart von Blut nachweisen. Die Kurve der gebleichten Reste verläuft ziemlich gradlinig vom langwelligen Spektralende zum kurzwelligen ansteigend, ähnlich wie die von König (3) mitgeteilten Restkurven. Eine ähnliche Kurve erhält man, wenn man die Lösung von Froschnetzhäuten darstellt, welche in vivo im hellen diffusen Tageslicht gebleicht wurden. Ein Teil der Gelbfärbung ist sicher auf die Gallenlösung zu setzen, selbst wenn, wie in unserem Fall, mit blofsem Auge keine Färbung zu erkennen ist. Es wurde die Absorption einer Gallenlösung bestimmt, welche ebenso behandelt war, wie Sehpurpurlösungen und mindestens ebenso konzentriert war, wie in den definitiven Sehpurpurlösungen der Methode I; sie zeigte eine nach dem Violett hin zunehmende Absorption. Es scheint mit grofsen Schwierigkeiten verbunden zu sein, worüber auch Köttgen und Abelsdorff berichten, streng farblose Gallenlösungen herzustellen. Da diese geringe Gelbfärbung aber allein zur Erklärung der Färbung der Rester kaum ausreicht, ist weiter an die Pigmentreste zu denken, welche nur zu leicht den Netzhäuten anhaften bleiben, sowie an die gelbgefärbten Öltropfen der Pigmentepithelien; wogegen nur zu bemerken ist, dafs nach Ewald u. Kühne Pigment und gelbe Tropfen in Galle unlöslich sind, sowie, dafs bei Kaninchen die Fettropfen in den Epithelzellen überhaupt fehlen. Da jedenfalls kein Grund vorliegt, die Gelbfärbung des Restes als Produkt des Sehpurpurs anzusehen, ist es berechtigt, die Restkurve zur Ermittlung der Kurve für

Sehpurpur-allein in Rechnung zu ziehen, wie dies von König, Köttgen u. Abelsdorff geschehen ist und auch im folgenden geschehen soll. — Da die definitiven Bleichungsversuche an Kaninchensehpurpur angestellt wurden, sollen nur für diesen Absorptionsmessungen des näheren angegeben werden.

2. Absorptionskurve des Kaninchensehpurpurs.

In ihrer eingehenden Bearbeitung des Sehpurpurs in der Wirbeltierreihe haben Köttgen u. Abelsdorff (5) Mittelwerte für die Absorptionskurve des Kaninchensehpurpurs angegeben. Um die Eigenschaften des von mir zu den Bleichungsversuchen verwendeten Sehpurpurs in dieser Richtung festzulegen, sei hier eine Anzahl von Absorptionsbestimmungen mitgeteilt, welche an den gleichen Lösungen angestellt wurden, wie die Bleichungsmessungen. Die einzelnen Kurven erstrecken sich nur über Teile des Spektrums, gröfsere Reihen aufzunehmen, erschien wegen der durch eintretende Ermüdung möglichen Fehler unzweckmäfsig. Tabelle IV enthält sechs einzelne über zum Teil

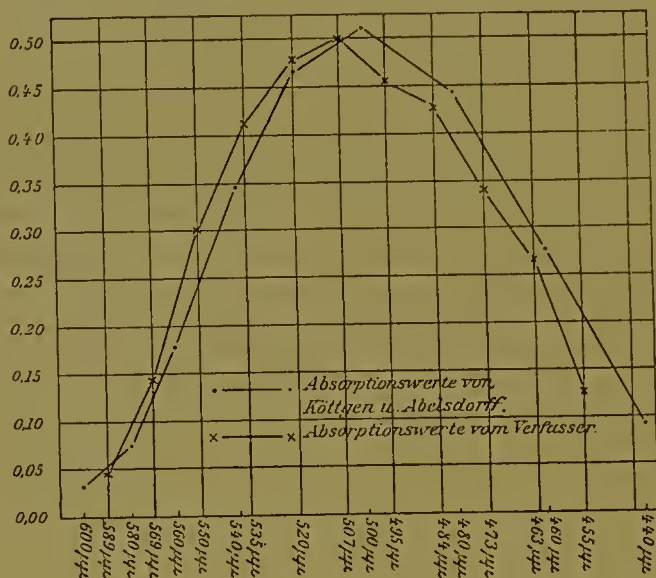
Tabelle IV.
Absorptionskurve des Kaninchensehpurpurs.

Wellenlänge in $\mu\mu$	Mittelwerte der einzelnen Versuchsreihen (berechnet für Purpur allein)						Mittelwerte für alle auf gleiche Konzentration umgerechnete Versuchsreihen
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	
589	0,0268	0,0456	0,0524	0,0593			0,0483
569	0,1294			0,1651			0,1472
550	0,3139	0,2849	0,2815	0,2793			0,3011
535	0,4055			0,4245			0,4150
520	0,4629	0,4308	0,4517	0,5077			0,4783
507	0,5020	0,4734	0,4765	0,5090	0,5524	0,5294	0,5012
495		0,4004	0,4329		0,5067	0,5116	0,4535
484					0,4701	0,4708	0,4244
473	0,3408	0,2808	0,3026		0,3944	0,3909	0,3357
463					0,2938	0,2933	0,2606
455		0,1106	0,1355				0,1340

verschiedene Regionen des Spektrum sich erstreckende Versuchsreihen, sowie die aus diesen nach Umrechnung auf gleiche Konzentration erhaltenen Mittelwerte. Fig. 5 zeigt eine Zusammen-

stellung dieser Mittelwerte mit den von Köttgen und Abelsdorff für Kaninchensehpurpur angegebenen. Eine besondere Be-

Fig. 5.
Absorptionskurve des Kaninchensehpurpurs.



sprechung verlangen Tabelle V und VI. In diesen Versuchen sind nicht nur in der besprochenen Weise die Absorptionswerte vor und nach der Bleichung aufgenommen worden, sondern dazwischen noch einmal nach kurzer Bleichung im diffusen Tageslicht. In ähnlicher Weise haben Köttgen und Abelsdorff eine grofse Anzahl von Versuchen angestellt, um damit die Frage nach der Existenz des Sehgelbs zu entscheiden. Das Sehgelb, welches nach Kühne als Zwischenprodukt der Sehpurpurbleichung

Tabelle V und VI.
Kaninchensehpurpur, Absorptionskoeffizienten, berechnet für Purpur-allein.

Tabelle V.

Wellenlänge μμ	Ungebleicht	6 Sekunden gebleicht
507	0,5294	0,3682
495	0,5116	0,3540
484	0,4708	0,3356
473	0,3909	0,2867
463	0,2933	0,2065

Tabelle VI.

Wellenlänge μμ	Ungebleicht	5 Sekunden gebleicht
507	0,5524	0,4416
495	0,5067	0,4190
484	0,4701	0,3927
473	0,3944	0,3166
463	0,2938	0,2201

aufzufassen ist, müfste offenbar der Absorptionskurve einen anderen Verlauf, einen anderen Gipfelpunkt geben, weil an Stelle des zersetzten Sehpurpurteils Stoffe treten, welche das kurzwellige Licht stärker absorbieren, wie der Sehpurpur selbst. Es zeigte sich nun, dafs die Absorptionskurven des ungebleichten und des partiell gebleichten Purpurs keine qualitativen Unterschiede zeigten, woraus Köttgen und Abelsdorff schlossen, dafs die Sehpurpurbleichung nur eine Konzentrationsabnahme des Stoffes ohne Auftreten farbiger Zwischenprodukte darstellt. Ich kann mich nach den vorgelegten Nachprüfungen dieser Meinung nur anschliefsen. Durch folgende Berechnung (Tab. VII) kann man näher feststellen, mit welcher Genauigkeit die Werte für ungebleichte und partiell gebleichte Lösungen nur auf Konzentrationsunterschiede hinweisen. Wenn k die Ausgangskonzentration ist, k' die Konzentration des übrigbleibenden Purpurs nach teilweiser Bleichung, so ist $k' = \frac{\log J'}{\log J}$, wenn $k = 1$ gesetzt wird. Hierbei bedeutet J die vom ungebleichten Purpur durchgelassene Lichtmenge, J' die nach teilweiser Bleichung vom Sehpurpur durchgelassene. Wendet man die Formel für die einzelnen Punkte der Absorptionskurven an, so mufs ein konstantes k' herauskommen. Die Tabelle VII zeigt, dafs dies mit Annäherung der Fall ist.

Wenn hiermit hervorgehoben werden mufs, dafs die Existenz von Sehgelb nicht erweisbar ist, so gilt dies zunächst nur für die nach den üblichen Methoden hergestellten Lösungen. Für die purpurhaltigen Netzhäute selbst kann natürlich die blofse Besichtigung keine Entscheidung über Vorhandensein von Sehgelbbildung geben; anhaftende Pigmentreste, Blut-

Tabelle VII.

a) (Vgl. Tabelle V.)

Wellenlänge $\mu\mu$	Durchlässigkeitskoeffizienten für Purpur-allein: J Ungebleicht	Durchlässigkeitskoeffizienten für Purpur-allein: J' 6 Sekunden gebleicht	$\frac{\log J'}{\log J}$ $(= k')$
507	0,4706	0,6318	0,609
495	0,4884	0,6450	0,612
484	0,5292	0,6644	0,642
473	0,6091	0,7133	0,681
463	0,7067	0,7935	0,666

b) (Vgl. Tabelle VI.)

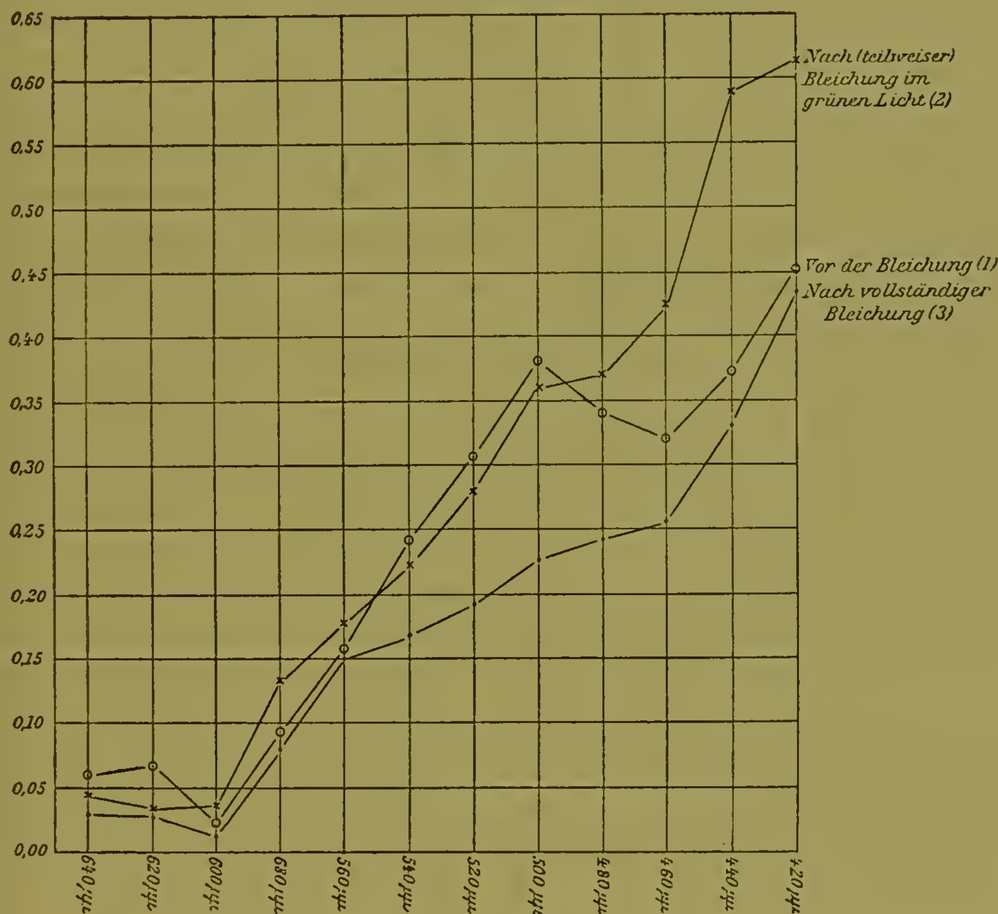
Wellenlänge $\mu\mu$	Durchlässigkeitskoeffizienten für Purpur-allein		$\frac{\log J'}{\log J}$ $(=k')$
	J Ungebleicht	J' 5 Sekunden gebleicht	
507	0,4476	0,5584	0,725
495	0,4933	0,5810	0,768
484	0,5299	0,6073	0,785
473	0,6056	0,6834	0,759
463	0,7062	0,7799	0,715

reste und ähnliches können zu leicht Anlafs von Täuschungen sein. Auch hier müssen feinere optische Methoden ausschlaggebend werden. Ein Beginn ist von Hamburger (2) gemacht, welcher durch Vergleich der Netzhautfarbe mit Farbtafeln feststellte, dafs monochromatisches Licht verschiedener Wellenlänge die gleichen Farbenänderungen hervorruft. Vielleicht liefsen sich durch mikrospektrometrische Absorptionsbestimmungen sicherere Aufschlüsse erhalten.

Es erübrigt noch, einen Blick auf die von König (3) gegebene Kurve des aus dem menschlichen Sehpurpur angeblich entstehenden Sehgelbs zu werfen, und zu prüfen, ob darin ein Beweis für die Existenz des gelben Zwischenproduktes gegeben ist. König bestimmte an einem Teil der von ihm aus der menschlichen Netzhaut dargestellten Sehpurpurlösung die Absorption zunächst vor der Bleichung, sodann nach (teilweiser) Bleichung im grünen Spektrallicht ($\lambda > 520$ $\mu\mu$) und schliefslich nach gänzlicher Bleichung. Zur Veranschaulichung diene Fig. 6, die nach den Königschen Tabellen gezeichnet wurde. Die Durchlässigkeitskoeffizienten sind in Absorptionskoeffizienten umgeschrieben. Die vor jeder Bleichung erhaltenen Werte sind in der Königschen Tabelle I unter „Vor der Bleichung. Zweite Füllung" zu finden; die Werte nach der Bleichung im grünen Licht in Tabelle II unter „Vor der Bleichung" (d. h. vor der vollständigen Bleichung), und schliefslich die Werte nach völliger Bleichung auch des „Sehgelbgemisches" in Tabelle II unter „Nach der Bleichung". (Die für das „Sehgelbgemisch"-allein berechneten Werte wurden in die Figur der besseren Übersicht wegen nicht aufgenommen.) Die Figur gibt also eine Übersicht über den Verlauf der Bleichung nach den beobachteten Werten.

Es zeigt sich daſs die Kurve nach teilweiser Bleichung (Kurve 2) vor 640—500 $\mu\mu$ zum Teil über, zum Teil unter der vor der Bleichung gültigen Kurve 1 liegt, und man kann sich des Eindrucks nicht erwehren, als ob dies zum Teil auf Beobachtungsunsicherheit beruht; dann pflegt weiter im Violett die Beobachtungsschwierigkeit bedeutend zuzunehmen. Doch es ist immer miſslich, an den Resultaten eines ausgezeichneten Forschers

Fig. 6.



Nach König [3] Tab. I und II.

Kritik zu üben, welcher so früh seinem Wirken und zugleich seiner Rechtfertigung entrissen wurde, und so sei es dahingestellt, ob die Kurven für die Existenz von Sehgelb beweisend sind. Daſs die Lösungen von Kaninchen- und Affensehpurpur ohne Bildung von Sehgelb bleichen, ist durch Köttgen und Abelsdorff ganz sicher bewiesen. Würde nun der menschliche Purpur abweichend davon bei der Bleichung Sehgelb bilden, so müſste er wohl von ganz abweichender Beschaffenheit sein. Wie wäre

aber dann die von den genannten Autoren aufgedeckte Übereinstimmung der Absorptionskurven von Kaninchen-, Affen- und Menschensehpurpur erklärlich? Allein schon vom entwicklungstheoretischen Standpunkt aus erschiene ferner eine so fundamentale Verschiedenheit nicht verständlich.

d) Absorbierte Energien und Dämmerungswerte.

Für die Kenntnis der Bedeutung des Sehpurpurs ist eine Berechnung von grofser Wichtigkeit, die König (3) in der erwähnten Arbeit ausführte. Er verglich die spektrale Helligkeitsverteilung für den Totalfarbenblinden, mit welcher die für den Dichromaten und Trichromaten bei „minimalster Intensität“ übereinstimme, mit der spektralen Absorptionsverteilung des Sehpurpurs. Dafür war es nötig „die spektralen Helligkeitswerte sowohl für das Sehen der Totalfarbenblinden wie auch für die Reizschwelle auf ein Spektrum zu beziehen, welches mit gleichmäfsiger Energieverteilung die den Sehpurpur enthaltende Schicht erreicht, nachdem es also vorher die Linse und das Pigment der Macula lutea passiert hat“. Der Berechnung auf gleichmäfsige Energieverteilung wurden die Messungen von P. S. Langley zugrunde gelegt; die Absorption in der Linse (Alter 55 Jahre) und in der Macula lutea wurde in Rechnung gezogen, die Absorptionskoeffizienten wurden für eine dem Sehpurpur im Auge entsprechende Schichtdicke umgerechnet. Auf diese Weise festgestellt, stimmten die Kurve der Reizwerte bei totaler Farbenblindheit, der Helligkeitswerte für die Reizschwelle (Dämmerungswerte) und der Absorptionsverteilung des Sehpurpurs gut überein. Hieraus schlofs König, dafs die Absorption des Sehpurpurs den Reizwerten der Lichter geringer Intensität (Dämmerungswerten) proportional ist.

Dieses wichtige Ergebnis scheint mir in seiner Bedeutung nicht genügend gewürdigt worden zu sein. Vielleicht ist dies darauf zurückzuführen, dafs andere Ergebnisse der gleichen Königschen Arbeit nicht unwidersprochen bleiben konnten; die Identifizierung der Sehgelbkurve mit der „Verteilung der Blauwerte“ führten König zur Annahme der Blaublindheit der Fovea, welche als irrtümlich erwiesen wurde. Vollständig unberührt bleibt aber davon die von König nachgewiesene Übereinstimmung der Sehpurpurabsorptionskurve (unter Berücksichtigung der Energieverteilung) mit den Dämmerungswerten und den Reiz-

werten für den Totalfarbenblinden. Wenn auch, wie ich annehmen mufs, die Königsche Sehgelbkurve nicht den tatsächlichen Verhältnissen entspricht, so liegt andererseits nicht der geringste Grund vor, an der Richtigkeit seiner Absorptionskurven für Sehpurpur zu zweifeln.

Wenn im folgenden an anderem Material ein entsprechender Vergleich angestellt wurde, so ist nicht verkannt worden, dafs die besondere Bedeutung der Königschen Feststellung in ihrer Gültigkeit für m e n s c h l i c h e n Sehpurpur liegt. Es erscheint aber nicht unberechtigt, auch die Absorptionskurve von Kaninchensehpurpur heranzuziehen, da, wie erwähnt, durch die Untersuchung von Köttgen und Abelsdorff die völlige Übereinstimmung der Absorption des menschlichen Sehpurpurs mit der anderer Warmblüter, speziell auch des Kaninchens nachgewiesen ist. Ich lege im folgenden die von mir oben mitgeteilte Absorptionskurve des Kaninchensehpurpurs zugrunde. Anstatt die Dämmerungswerte umzurechnen, zog ich es vor, aus den Absorptionswerten des Sehpurpurs die von ihm absorbierten Energiemengen festzustellen. Ich benutzte hierzu die von König (4) gegebene Tabelle der Energieverteilung im Dispersionsspektrum des Gaslichtes, nach welcher ich für die Wellenlängen der Sehpurpurabsorptionskurve interpolierte. Um gröfsere Annäherung an die Verhältnisse im Auge zu erzielen, wurden die Absorptionswerte auch für unendlich dünne Schicht berechnet, für welche sie dem Wert $-\log J$ proportional sind (wo J die von endlicher Schicht durchgelassene Lichtmenge bedeutet). Die absorbierten Energiemengen wurden nun sowohl für die auf unendlich dünne Schicht umgerechneten Absorptionswerte, sowie für die ursprünglichen bestimmt, weil die Schichtdicke, bzw. Konzentration des Sehpurpurs im Auge jedenfalls nicht unendlich dünn, aber auch geringer als diejenige der zur Absorptionsbestimmung verwendeten Lösung ist. Während betreffs des ersteren Punktes auf frühere Erörterungen hingewiesen werden kann, läfst sich letzteres leicht durch eine Überschlagsberechnung dartun, die ähnlich von König ausgeführt wurde. Aus dem früher Gesagten geht hervor, dafs die Lösungen Purpur von 6 Netzhäuten in ca. 1000 cmm Wasser enthielten. Die Schichtdicke bei der Absorptionsbestimmung betrug 3 mm; mit der Lösung hätte also eine Fläche von 333 qmm 3 mm hoch bedeckt werden können. In dieser Schicht wäre aber der Sehpurpur von 6 Netzhäuten enthalten gewesen, der

Purpur nur einer Netzhaut würde also in vorliegender Lösung die Fläche von 333 qmm nur 0,5 mm hoch bedecken können. Nimmt man nun zur Vereinfachung an, die verwendete Netzhautfläche des Kaninchenauges wäre gerade 333 qmm (ein Wert, der zu niedrig ist, so dafs die Rechnung a fortiori gültig wird), so hätte die Absorption der Lösung bei einer Schichtdicke von nur 0,5 mm bestimmt werden müssen. Daraus geht hervor, dafs die Purpurkonzentration im Auge (gleiche Schichtdicke vorausgesetzt) geringer war und dafs der richtige Wert zwischen dem für die vorliegende Lösung direkt gefundenen und dem für unendlich dünne Schicht berechneten liegen mufs. Hier ist nur vorausgesetzt, dafs die Sehpurpurkonzentration im Kaninchenauge und Menschenauge annähernd gleich, in letzterem jedenfalls nicht viel gröfser ist. Auch dies läfst sich mit Hilfe der Königschen Angaben zeigen. Königs Lösung absorbierte bei 500 $\mu\mu$ 0,200, die meinige bei 507 $\mu\mu$ 0,5012; da nun einerseits bei der letzteren die nur einer Netzhaut entsprechende Konzentration $^1/_6$ der verwendeten sein würde, andererseits König in nur 500 cmm Wasser löste, also in der Hälfte der von mir angewandten Menge, und eine Schichtdicke von 4 mm verwendete, gegen 3 mm bei meinen Versuchen, so mufs der Absorptionswert 0,5012 für eine $\frac{2 \cdot 4}{6 \cdot 3}$ mal kleinere Konzentration umgerechnet werden, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Für diese Konzentration wäre die Absorption des Kaninchensehpurpurs 0,2659, gegen 0,200 des menschlichen Purpurs. Es ist also die Konzentration des Sehpurpurs im Kaninchenauge eher gröfser, als im menschlichen Auge anzunehmen. Schliefslich sei bei dieser Gelegenheit erwähnt, dafs sich die Sehpurpurkonzentration im Kaninchenauge zu derjenigen in den von mir verwendeten Lösungen (bei Annahme gleicher Schichtdicke) etwa wie 1 : 7 verhält, wobei die zur Darstellung verwendete Netzhautfläche zu ca. 400 qmm berechnet ist; allzu grofse Genauigkeit kann diese Angabe schon wegen der verschiedenen Gröfse der verwendeten Augen nicht beanspruchen. Bei den vorstehenden Berechnungen ist natürlich sowohl für das Kaninchen- wie für das Menschenauge eine gleichmäfsige Verteilung des Sehpurpurs auf alle Teile der Netzhaut angenommen, die bekanntlich nicht überall vorhanden ist. Ferner ist vorausgesetzt, dafs bei der Sehpurpurdarstellung kein Verlust dieses Stoffes eintritt. —

Zum Vergleich mit den Kurven der absorbierten Energien wählte ich die von Schaternikoff (11) mit sehr exakter Methode bestimmten Dämmerungswerte des Gaslichtes, nach welchen ich für die Wellenlängen der Absorptionskurven so weit nötig interpolierte. Die Werte wurden weiter zur besseren Übersicht auf gleiche maximale Höhe mit den absorbierten Energien berechnet. Von einer Berücksichtigung der Linsenabsorption konnte bei dem Alter des Autors der Dämmerungswerte abgesehen werden. Desgleichen aber glaubte ich auch von einer Einberechnung der Makulaabsorption Abstand nehmen zu müssen. Eine foveale Beobachtung ist der Natur der Sache nach ausgeschlossen, und da die Empfindlichkeit der dunkeladaptierten Netzhaut parazentral

Tabelle VIII.

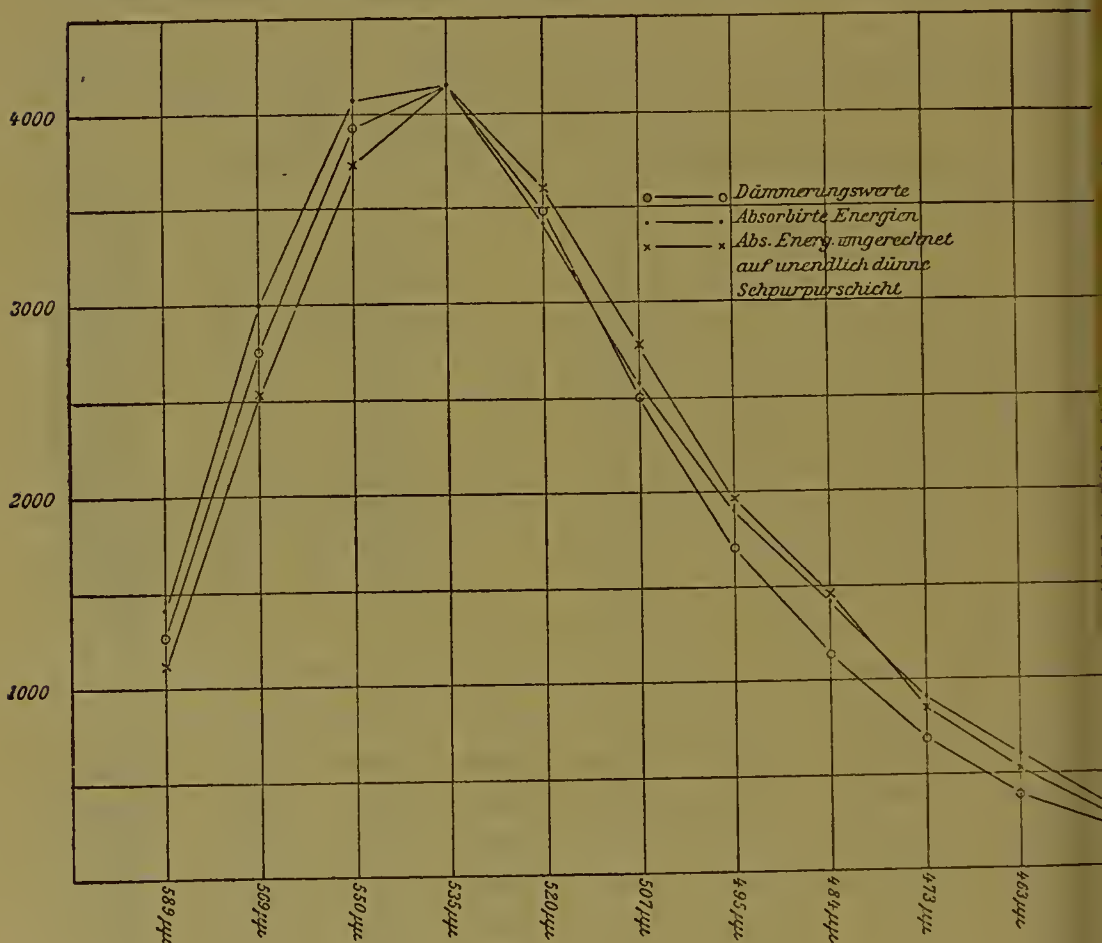
Von Sehpurpur absorbierte Energiemengen und Dämmerungswerte (Gaslicht).

Wellenlänge in $\mu\mu$	Absorptionskoeffizienten für Kaninchensehpurpur ($= A$)	Energiewerte des Gaslichtspektrum (nach König interpoliert) ($= E$)	Absorbierte Energiemengen berechnet für Kaninchensehpurpur ($= E \cdot A \cdot 10000$)	$-\log J$ ($J = 1 - A$)	Von unendlich dünner Schicht absorbierte Energiemengen ($= -\log J \cdot E \cdot 10000$)	$-\log J \cdot E$ auf gleiche maximale Höhe mit $E \cdot A$ berechnet	Dämmerungswerte für Gaslicht (nach Schaternikoff interpoliert), für gleiche maximale Höhe mit $E \cdot A$ umgerechnet
589	0,0483	2,923	1412	0,0215	628,4	1120	1247
569	0,1472	2,033	2993	0,0692	1407	2508	2721
550	0,3011	1,360	4095	0,1556	2116	3772	3936
535	0,4150	1,000	4150	0,2328	2328	4150	4150
520	0,4783	0,720	3444	0,2826	2035	3627	3456
507	0,5012	0,519	2601	0,3021	1568	2795	2560
495	0,4535	0,409	1855	0,2624	1073	1913	1709
484	0,4244	0,334	1418	0,2399	801,3	1428	1141
473	0,3357	0,269	903,1	0,1776	477,7	851,6	688,3
463	0,2606	0,222	578,5	0,1311	291,0	518,8	393,2
455	0,1340	0,189	253,3	0,0625	118,1	210,6	226,3

erheblich wächst, ist es naturgemäfs gegeben, die Dämmerungswerte an mehr oder weniger peripheren Netzhautteilen zu bestimmen, an Teilen, an welchen die Makulatingierung nicht mehr in nennenswerter Weise in Betracht kommen kann. Tabelle VIII enthält die, wie beschrieben, berechneten Werte, nach denen Fig. 7 gezeichnet ist. Die weitgehende Übereinstimmung der Kurven der absorbierten Energiemengen und der Dämmerungswerte ist ohne weiteres einleuchtend. Betrachtet man des

Fig. 7.

Zusammenstellung der durch Kaninchensehpurpur absorbierten Energiemengen (für Gaslicht) mit den Dämmerungswerten (nach Schaternikoff, für Gaslicht), auf gleiche maximale Höhe berechnet.



näheren zunächst die Strecke zwischen 589 μμ und 520—507 μμ, so findet man hier die Kurve der Dämmerungswerte zwischen den beiden Kurven der absorbierten Energien, der für endliche und der für unendlich dünne Schicht, ein Verhalten, welches

vollkommen den theoretischen Erwartungen entspricht. Nur im kurzwelligen Spektralteil liegt die Kurve der Dämmerungswerte ein wenig tiefer wie die der absorbierten Energiemengen. Es sei dazu nur bemerkt, daſs eine Mitberücksichtigung schwacher Makulatingierung (an ihrer Grenze) den Unterschied noch verringert haben würde. Soviel läſst sich mit Sicherheit sagen, daſs die Kurven der Dämmerungswerte und der vom Sehpurpur absorbierten Energiemengen mit groſser Annäherung identisch sind, ein Ergebnis, welches im besten Einklang mit der Hypothese über die Bedeutung des Sehpurpurs für das „Dämmerungssehen" steht. Die Reizwerte der vom dunkeladaptierten Auge farblos gesehenen spektralen Lichter hängen von den Energiemengen ab, welche dem Sehpurpur des Auges von den einzelnen Lichtern zugeführt werden, indem die Menge der absorbierten Lichtenergie die Stärke der Zersetzung des Sehpurpurs und damit den Reizwert für die Stäbchen bestimmt.

Durch die Energiemessungen, welche A. Pflüger am Dispersionsspektrum des Nernstlichts ausgeführt hat, ist die Möglichkeit gegeben, eine analoge Berechnung wie für die Dämmerungswerte des Gaslichts auch für die des Nernstlichts zu geben. Es würde allerdings nicht ohne weiteres angehen, die früher mitgeteilten Werte zu benutzen; diese waren ja, um die Versuchsbedingungen der Bleichungen möglichst einzuhalten, bei einem weniger reinen Spektrum bestimmt, während es hier natürlich darauf ankommt, solche heranzuziehen, die für möglichst reines Spektrum gültig sind. Im Beginn der Arbeiten haben nun Herr Prof. Kingsbury und ich solche Werte in neun Versuchsreihen bestimmt, in welchen ersterer beobachtete, letzterer die Einstellungen und Ablesungen besorgte. In folgenden Punkten wich die Einrichtung von der oben beschriebenen ab. Die etwas seitlich von der Verlängerung der Längsachse des Spektralapparats stehende Nernstlampe beleuchtete eine hinten geschwärzte Glasplatte; diese reflektierte das Licht auf eine vor dem Spalt *Sp* in einer Kapsel befindliche kleine Magnesiumoxydfläche, von welcher aus der Spalt beleuchtet war. Der Kartonschirm *C* wurde durch eine mehrere Meter entfernte kleinbrennende „Pulslampe" konstant beleuchtet; die Einstellung auf Helligkeitsgleichheit erfolgte durch Variierung der Breite des Spaltes *Sp*, welche mittels Schnurlaufs vom Beobachter selbst vorgenommen wurde. Für die ein-

zelnen Wellenlängen wurden je 3 Einstellungen hintereinander gemacht, deren Mittelwert genommen wurde. Bei diesen Versuchen wurde nicht, wie bei den oben mitgeteilten vor und nach den 3 Einstellungen einer bestimmten Farbe die Einstellung für Natriumlicht gemacht, so dafs nicht ganz die gleiche Sicherheit gegen etwaige geringe Schwankungen der Beleuchtung gegeben war; auch diente nicht, wie bei den Untersuchungen von Schaternikoff, die das Spektrum liefernde Lichtquelle zugleich als Vergleichslicht. Wir können deshalb für diese Dämmerungswerte nicht den Grad der Genauigkeit der Schaternikoffschen beanspruchen.

Die Resultate der Berechnung sind etwas gekürzt in Tabelle IX enthalten, die in Teil I der Tabelle VIII völlig entspricht, also ohne weiteres verständlich sein dürfte.

Im Teil II der Tabelle IX sind die Dämmerungswerte für Nernstlicht enthalten. Es wurden nur für 8 verschiedene Wellenlängen die Werte bestimmt. Es wäre deshalb nicht zweckmäfsig gewesen, für alle Wellenlängen der Sehpurpurabsorptionskurven

Tabelle IX.

I. Von Sehpurpur absorbierte Energiemengen des Nernstlichtspektrum.

Wellenlänge $\mu\mu$	Absorptionskoeffizienten für Kaninchensehpurpur (= A)	Energiewerte des Nernstlichtspektrum, nach A. Pflüger interpoliert, für λ 535 = 100 berechnet (= E)	Von Sehpurpur absorbierte Energiemengen (= $A \cdot E \cdot 100$)	Desgleichen für unendlich dünne Schicht u. auf gleiche maximale Höhe wie voriges berechnet
589	0,0483	232,1	1121	889,6
569	0,1472	177,4	2611	2188
550	0,3011	131,2	3949	3638
535	0,4150	100,0	4150	4150
520	0,4783	73,81	3530	3718
507	0,5012	55,34	2773	2980
495	0,4535	42,18	1913	1973
484	0,4244	32,12	1363	1374
473	0,3357	23,93	803,2	757,5
463	0,2606	18,20	474,2	425,2
455	0,1340	14,26	191,0	158,8

II. Dämmerungswerte des Nernstlichtdispersionsspektrum (Kingsbury und Verf.; Beobachter Kingsbury).

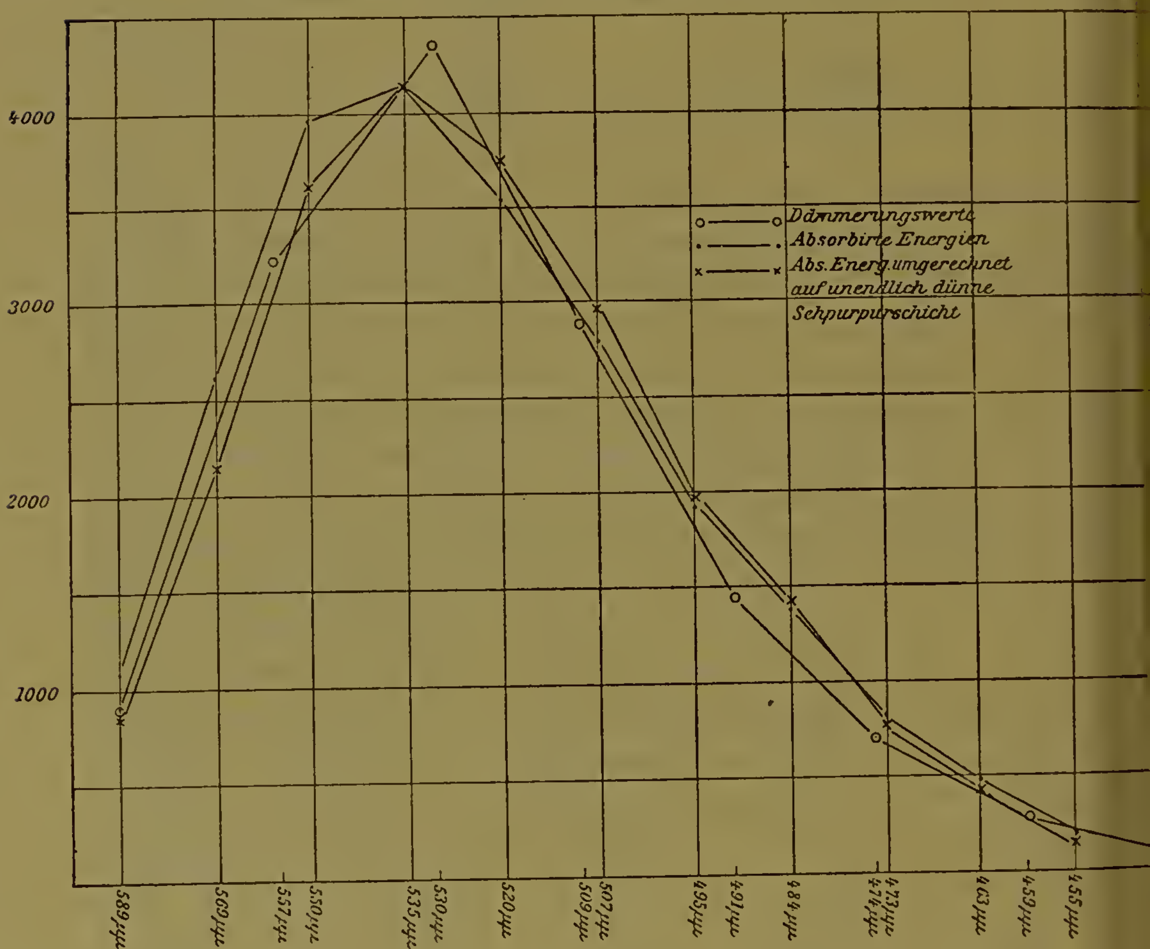
Wellenlänge $\mu\mu$	Mittelwerte der 9 Versuchsreihen für *DW.* 535 $\mu\mu$ = 4150 berechnet
589	932
557	3240
535	4150 (interpoliert)
530	4357
509	2916
491	1449
474	713
459	277
445	110

zu interpolieren, da die Interpolation nur dann Näherungswerte liefert, wenn die zur Interpolation dienenden Werte nahe beieinander liegen. Es wurde deshalb nur der Wert für 535 $\mu\mu$ interpoliert, um mit Hilfe dessen die Kurve wieder auf dieselbe maximale Höhe 4150 bei 535 $\mu\mu$ umrechnen zu können. Fig. 8 gibt die Zusammenstellung der absorbierten Energiemengen und Dämmerungswerte des Nernstlichts. Auch hier zeigt sich im allgemeinen die gleiche gute Übereinstimmung, welche schon der vorige Vergleich ergeben hatte. Im besonderen liegen auch hier wieder die Dämmerungswerte im kurzwelligen Spektralteil etwas tiefer wie die Kurve der absorbierten Energien (vgl. bei 491 und 474 $\mu\mu$). Auch hier könnte vielleicht wieder in geringem Grade der Einfluſs der Makulatingierung in ihren Randteilen mitspielen. (Weniger gut ist die Übereinstimmung am Gipfelpunkt, welcher vielleicht für die Dämmerungswerte etwas zu hoch gefunden wurde.) Im ganzen wird die schon oben gezogene Schluſsfolgerung auch durch diesen zweiten Vergleich bestätigt.

Hat sich somit ergeben, daſs sowohl die quantitative Untersuchung des Bleichungsverlaufs als auch die nochmalige Verfolgung der Absorptionsverhältnisse des Sehpurpurs unter Berücksichtigung der Energieverteilung im Spektrum in vollem Einklang mit der Hypothese über die Bedeutung des Sehpurpurs für das Dämmerungssehen stehen, so ist auf Grund der vorliegenden Resultate noch eine kurze Beleuchtung anderer Ansichten über die Funktion dieses Stoffes nötig. Auſser einigen

rein spekulativen theoretischen Anschauungen liegt aus neuester Zeit eine näher begründete Hypothese von Sivén u. v. Wendt (12) vor. Diese Autoren schreiben dem Sehpurpur auf Grund von Versuchen über die Santoninwirkung auf das Auge eine ganz andere Rolle zu; der Sehpurpur soll nach ihnen die Empfindung

Fig. 8.
Zusammenstellung der durch Kaninchensehpurpur absorbierten Energiemengen (für Nernstlicht) mit den Dämmerungswerten (für Nernstlicht), berechnet auf gleiche maximale Höhe.



des Violett vermitteln. Nach den Resultaten der vorliegenden Arbeit ist dies aber recht unwahrscheinlich. Ist doch schon bei 459 $\mu\mu$, im Blau-Violett, die Lichtwirkung auf den Sehpurpur nur $^1/_4$ von der des Natriumlichtes, wonach allein schon der Sehpurpur als durchaus ungeeignet erscheint, die Empfindung gerade des kurzwelligen Spektralteils zu vermitteln.

Wenn die vorliegenden Untersuchungen eine weitere Stütze für eine bestimmte Hypothese enthalten, so bin ich mir wohl bewufst, dafs ihnen keineswegs jeder nur erreichbare Grad von Genauigkeit zukommt. Besonders wäre eine exaktere physikalisch-chemische Behandlung der Bleichungen wünschenswert. Es lag nahe, den Versuch zu machen, aus den vorliegenden Messungen des Bleichungsverlaufs Reaktionskonstanten für die einzelnen Bleichlichter zu berechnen und aus ihnen die Stärke der Bleichungswirkung zu entnehmen. Ich habe diese Rechnungen für viele der Versuche durchgeführt, indem ich die Absorptionskurven zunächst in Konzentrationskurven umrechnete und dann unter Voraussetzung einer monomolekularen Reaktion die Reaktionskonstante ermittelte. Im allgemeinen zeigte sich, dafs letztere im Bleichungsverlauf abnahm; es wäre möglich, dies auf eine Regeneration des Purpurs aus den Bleichungsprodukten (reversible Reaktion) zurückzuführen, welche nach Kühne nicht nur an epithelfreien Netzhäuten, sondern auch an Lösungen erfolgen soll. Im ganzen waren aber die Resultate nicht konstant genug, um sichere Schlüsse zu erlauben, so dafs ich auf diese Verhältnisse nicht näher eingehen will.

Anhang:

Umrechnung

der Bleichungswerte auf unendlich dünne Schicht des Sehpurpurs.

Versuch I. Bleichlichter 542 und 589 $\mu\mu$.

Unkorrigierter Mittelwert 1:2,7.

Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 542 $\mu\mu$

0,718 zu Anfang

0,797 nach $1/2$ Stunde

0,7575 als Mittel für die benutzte Kurvenstrecke in Rechnung gezogen.

b) 589 $\mu\mu$

0,916 zu Anfang

0,933 nach $1\,1/2$ Stunden

0,9245 Mittel.

$$\frac{1}{2,7} \cdot \frac{0,7575}{0,9245} = \frac{1}{3,30}$$

Versuch II. Bleichlichter 542 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,94.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 542 $\mu\mu$

0,691 zu Anfang
0,786 nach ½ Stunde
0,7385 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,869 zu Anfang
0,895 nach 1½ Stunden
0,882 Mittel.

$$\frac{1}{2{,}94} \cdot \frac{0{,}7385}{0{,}882} = \frac{1}{3{,}51}$$

Versuch III. Bleichlichter 530 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,9.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 530 $\mu\mu$

0,709 zu Anfang
0,803 nach ½ Stunde
0,756 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,901 zu Anfang (da in diesem Versuch nach 1½ Stunden keine Absorptionsbestimmung bei 589 $\mu\mu$ ausgeführt wurde, ist nur der am Anfang gefundene Wert in Rechnung gezogen worden. Der korrigierte Wert 3,46 ist also eher etwas zu niedrig).

$$\frac{1}{2{,}9} \cdot \frac{0{,}756}{0{,}901} = \frac{1}{3{,}46}$$

Versuch IV. Bleichlichter 530 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:3,1.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 530 $\mu\mu$

0,737 zu Anfang
0,823 nach ½ Stunde
0,780 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,900 zu Anfang
0,911 nach 1½ Stunden
0,9055 Mittel.

$$\frac{1}{3{,}1} \cdot \frac{0{,}780}{0{,}9055} = \frac{1}{3{,}60}$$

Versuch V. Bleichlichter 530 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,96.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 530 $\mu\mu$

0,645 zu Anfang
0,744 nach ½ Stunde
0,6945 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,872 zu Anfang
0,910 nach 1½ Stunden
0,891 Mittel.

$$\frac{1}{2{,}96} \cdot \frac{0{,}6945}{0{,}891} = \frac{1}{3{,}80}$$

Versuch VI. Bleichlichter 519 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,6.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 519 $\mu\mu$

0,653 zu Anfang
0,727 nach ½ Stunde

0,690 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,926 zu Anfang
0,919 nach 1½ Stunden (die Absorptionsbestimmung bei 589 $\mu\mu$ weist nach 1½ Stunden einen etwas höheren Wert auf wie anfangs, ohne dafs sich nachträglich der Grund mit Sicherheit feststellen liefs. Der eventuelle Korrektionsfehler ist jedenfalls nur gering).

0,9225 Mittel.

$$\frac{1}{2,6} \cdot \frac{0,690}{0,9225} = \frac{1}{3,48}$$

Versuch VII. Bleichlichter 519 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,4.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 519 $\mu\mu$

0,647 zu Anfang
0,739 nach ½ Stunde

0,693 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,894 zu Anfang
0,916 nach 1½ Stunden

0,905 Mittel.

$$\frac{1}{2,4} \cdot \frac{0,693}{0,905} = \frac{1}{3,13}$$

Versuch VIII. Bleichlichter 519 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,97.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 519 $\mu\mu$

0,600 zu Anfang
0,761 nach 1 Stunde

0,6805 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,886 zu Anfang
0,898 nach 1½ Stunden

0,892 Mittel.

$$\frac{1}{2,97} \cdot \frac{0,6805}{0,892} = \frac{1}{3,89}$$

Versuch IX. Bleichlichter 519 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,62.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 519 $\mu\mu$

0,688 zu Anfang
0,780 nach ½ Stunde

0,734 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,915 zu Anfang
0,934 nach 1½ Stunden

0,9245 Mittel.

$$\frac{1}{2,62} \cdot \frac{0,734}{0,9245} = \frac{1}{3\ 30}$$

Versuch X. Bleichlichter 509 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,02.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 509 $\mu\mu$

0,657 zu Anfang
0,687 nach ½ Stunde
0,672 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,899 zu Anfang
0,930 nach 1½ Stunden
0,9145 Mittel.

$$\frac{1}{2{,}02} \cdot \frac{0{,}672}{0{,}9145} = \frac{1}{2{,}75}$$

Versuch XI. Bleichlichter 509 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,38.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 509 $\mu\mu$

0,659 zu Anfang
0,725 nach ½ Stunde
0,692 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,893 zu Anfang
0,910 nach 1½ Stunden
0,9015 Mittel.

$$\frac{1}{2{,}38} \cdot \frac{0{,}692}{0{,}9015} = \frac{1}{3{,}10}$$

Versuch XII. Bleichlichter 509 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,45.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 509 $\mu\mu$

0,618 zu Anfang
0,705 nach ½ Stunde
0,6615 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,872 zu Anfang
0,902 nach 1½ Stunden
0,887 Mittel.

$$\frac{1}{2{,}45} \cdot \frac{0{,}6615}{0{,}887} = \frac{1}{3{,}29}$$

Versuch XIII. Bleichlichter 509 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:2,43.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 509 $\mu\mu$

0,663 zu Anfang
0,714 nach ½ Stunde
0,6885 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,894 zu Anfang
0,920 nach 1½ Stunden
0,907 Mittel.

$$\frac{1}{2{,}43} \cdot \frac{0{,}6885}{0{,}907} = \frac{1}{3{,}20}$$

Versuch XIV. Bleichlichter 491 und 589 $\mu\mu$.
Unkorrigierter Mittelwert 1:1,38.
Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 491 $\mu\mu$

0,610 zu Anfang
0,719 nach 1½ Stunden
0,6645 Mittel.

b) 589 $\mu\mu$

0,880 zu Anfang
0,897 nach 1½ Stunden
0,8885 Mittel.

$$\frac{1}{1{,}38} \cdot \frac{0{,}6645}{0{,}8885} = \frac{1}{1{,}845}$$

Versuch XV. Bleichlichter 491 und 589 μμ

Unkorrigierter Mittelwert 1:1,14.

Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 491 μμ

0,629 zu Anfang
0,722 nach 1 ½ Stunden
0,6755 Mittel.

b) 589 μμ

0,898 zu Anfang
0,925 nach 1 ½ Stunden
0,9115 Mittel.

$$\frac{1}{1,14} \cdot \frac{0,6755}{0,9115} = \frac{1}{1,54}$$

Versuch XVI. Bleichlichter 491 und 589 μμ.

Unkorrigierter Mittelwert 1:1,26.

Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 491 μμ

0,631 zu Anfang
0,733 nach 1 ½ Stunden
0,682 Mittel.

b) 589 μμ

0,898 zu Anfang
0,917 nach 1 ½ Stunden
0,9075 Mittel.

$$\frac{1}{1,26} \cdot \frac{0,682}{0,9075} = \frac{1}{1,68}$$

Versuch XVII. Bleichlichter 474 und 589 μμ.

Unkorrigierter Mittelwert 1:0,78.

Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 474 μμ

0,672 zu Anfang
0,737 nach 80 Minuten
0,7045 Mittel.

b) 589 μμ

0,887 zu Anfang
0,920 nach 80 Minuten
0,9035 Mittel.

$$\frac{1}{0,78} \cdot \frac{0,7045}{0,9035} = \frac{1}{1,00}$$

Versuch XVIII. Bleichlichter 474 und 589 μμ.

Unkorrigierter Mittelwert 1:0,73.

Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 474 μμ

0,678 zu Anfang
0,727 nach 80 Minuten
0,7025 Mittel.

b) 589 μμ

0,908 zu Anfang
0,927 nach 80 Minuten
0,9175 Mittel.

$$\frac{1}{0,73} \cdot \frac{0,7025}{0,9175} = \frac{1}{0,95}$$

Versuch XIX. Bleichlichter 459 und 589 μμ

Unkorrigierter Mittelwert 1:0,244.

Einwirkende mittlere Lichtstärke für

a) 459 μμ

0,725 zu Anfang
0,761 nach 2 Stunden
0,743 Mittel.

b) 589 μμ

0,906 zu Anfang
0,916 nach 1 Stunde
0,911 Mittel.

$$\frac{1}{0,244} \cdot \frac{0,743}{0,911} = \frac{1}{0,299}$$

Literatur.

1. A. Ewald und W. Kühne. Untersuchungen über den Sehpurpur. Untersuchungen aus dem physiologischen Institut der Universität Heidelberg **1**, 139—218; 248—290; 370—455. 1878.
2. H. J. Hamburger. Staafjesrood in Monochromatisch Licht. Onderzoek. Physiol. Labor. Utrecht **11**. 1—38. 1889.
3. A. König. Über den menschlichen Sehpurpur und seine Bedeutung für das Sehen. Bericht der Berliner Akademie der Wissenschaften 21. Juni 1894. 577—598 und König, Gesammelte Abhandlungen zur physiologischen Optik, Leipzig 1903. 338—363.
4. A. König. Über den Helligkeitswert der Spektralfarben bei verschiedener absoluter Intensität. Helmholtz-Festschrift 309—388. 1891. Gesammelte Abhandlungen 144—213.
5. E. Köttgen und G. Abelsdorff. Absorption und Zersetzung des Sehpurpurs bei den Wirbeltieren. *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg.* **12**. 161—184. 1896.
6. J. v. Kries. Über die Abhängigkeit der Dämmerungswerte vom Adaptationsgrade. Abhandlungen zur Physiologie der Gesichtsempfindungen 2, 138—151. 1902 und *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg.* 25, 225—238. 1901. Vgl. R. Stegmann, Dissertation Freiburg 1900.
7. W. Kühne. Über den Sehpurpur. Untersuchungen aus dem physiologischen Institut der Universität Heidelberg **1**, 15—103. 1878.
8. W. Kühne. Das Sehen ohne Sehpurpur. Untersuchungen aus dem physiologischen Institut der Universität Heidelberg **1**, 119—138. 1878.
9. W. Kühne. Zur Darstellung des Sehpurpurs. *Zeitschr. f. Biol.* **32**, 21—28. 1895.
10. A. Pflüger. Über die Farbenempfindlichkeit des Auges. *Annalen der Physik* 4. Folge, 9, 185—208. 1902.
11. M. Schaternikoff. Neue Bestimmungen über die Verteilung der Dämmerungswerte im Dispersionsspektrum des Gas- und des Sonnenlichtes. v. Kries Abhandlungen etc. 2, 189—197. 1902 und *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg.* 29, 255—263. 1902.
12. V. O. Sivén und G. v. Wendt. Über die physiologische Bedeutung des Sehpurpurs. Ein Beitrag zur Physiologie des Gelb-Violettsehens. I. Mitteilung. Über die Einwirkung des Santonins auf den Gesichtssinn. *Skand. Archiv f. Physiol.* **14**, 196—223. 1903.
13. A. Tschermak. Über spektrometrische Verwendung von Helium. *Pflügers Archiv* 88, 95—97. 1902.

(*Eingegangen am 6. August 1904.*)

(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Bestimmungen über das Mengenverhältnis komplementärer Spektralfarben in Weifsmischungen.[1]

Von

Dr. Roswell P. Angier, aus Cambridge U. S. A.

und

Dr. Wilhelm Trendelenburg, Privatdozent und Assistent am Institut.

Qualitative Bestimmungen komplementärer Spektralfarbenpaare, d. h. der Wellenlängen der eine Weifsmischung ergebenden Lichter, sind verschiedentlich ausgeführt worden, so von Helmholtz[2], v. Frey und v. Kries[3] sowie König.[4] Quantitative Feststellungen über das Mengenverhältnis, in welchem die ermittelten komplementären Spektralfarben gemischt werden müssen, um Weifs zu ergeben, sind von den letzterwähnten drei Autoren vorgenommen worden. Leider sind die Resultate Königs in ihrem Wert dadurch in Frage gestellt, dafs die Angabe fehlt, auf welches Spektrum sich die Beobachtungen beziehen; je nachdem ob das Spektrum etwa des Sonnen- oder Gaslichts verwendet wird, müssen die Mengenverhältnisse verschieden ausfallen, da die spektrale Helligkeitsverteilung von der verwendeten Lichtquelle abhängt. Allerdings geht schon aus den Weifswerten (Dämmerungswerten) der Königschen Tabelle mit ziemlicher

---

[1] Die Messungen wurden auf Bitte des Frl. Krarup, Kopenhagen, ausgeführt, welche sie zu besonderen Zwecken wünschte.

[2] v. Helmholtz: Physiologische Optik. 2. Aufl. 1896. S. 317.

[3] v. Frey, M. u. v. Kries, J.: Über die Mischung von Spektralfarben. Arch. f. (An. u.) Physiol. 1881. 336—353.

[4] König, A.: Quantitative Bestimmungen komplementärer Spektralfarben. Sitz.-Ber. d. Akad. d. Wiss. Berlin 1896. 2. 945—949. Ges. Abl 373—377.

Sicherheit hervor, dafs König das Spektrum des Gaslichts verwendete. Andererseits ist den älteren Bestimmungen von v. Frey und v. Kries gegenüber eine Wiederholung nicht unerwünscht, da sich diese mit vervollkommneten instrumentellen Hilfsmitteln ausführen läfst, welche die Mengenverhältnisse mit gröfserer Genauigkeit zu bestimmen gestatten.

Bei der Ausführung der Untersuchung erfreuten wir uns der mannigfachen Beratung von Herrn Prof. v. Kries, wofür wir unseren verbindlichsten Dank aussprechen möchten.

Da für die Zusammensetzung von Weifsmischungen in erster Linie die Natur des Vergleichsweifs in Betracht kommt, wäre es wünschenswert, ein genau definierbares Weifs zum Vergleich zu nehmen, welches auch von anderen Untersuchern stets in genau derselben Qualität hergestellt werden kann. König wählte dafür sein „Normalweifs", d. h. das von einer Magnesiumoxydfläche reflektierte Sonnenlicht. Doch läfst sich auch dieses Weifs nicht stets in gleicher Qualität herstellen, da das Sonnenlicht in seiner Zusammensetzung mit dem Zustand der Atmosphäre, Dicke der durchsetzten Schicht (also auch Tageszeit) wechseln mufs. Da man sich auch nicht blofs auf das Auge verlassen kann, indem man etwa das von einer beliebigen Lichtquelle ausgehende Licht qualitativ so lange ändert, bis der Eindruck völliger Farblosigkeit entsteht, so wird die Wahl des Vergleichsweifs immer einigermafsen konventionell sein.

Weil uns Sonnenlicht schon wegen der Jahreszeit (Tiefstand der Sonne) nicht passend zur Verfügung stand, wählten wir als Vergleichsweifs das von einer Magnesiumoxydfläche reflektierte Licht des gleichmäfsig weifsbewölkten Mittaghimmels. Wir mufsten uns dabei überzeugen, dafs auch bei sonst gleichen Bedingungen die Qualität des reflektierten Lichts an verschiedenen Tagen merklich verschieden war. Ist es also nicht möglich, das von uns benutzte Vergleichsweifs physikalisch exakt anzugeben, so ist es doch durch die anzugebenden Wellenlängen der Komplementärfarben und das Mengenverhältnis, in dem diese zu mischen sind, physiologisch genau definiert.

Das von der Magnesiumoxydfläche reflektierte Wolkenlicht konnte schon wegen seiner Inkonstanz nicht direkt als Vergleichsweifs verwendet werden, sondern es wurde zunächst das Licht einer mit Mattglocke versehenen Auerlampe durch Lichtfilter so verändert, dafs es dem zu bestimmter Zeit reflektierten Wolken-

licht qualitativ gleich war. Dies wurde mit Hilfe eines LUMMERschen Prismas[1] erreicht, dessen Ring von der das Wolkenlicht reflektierenden Magnesiumoxydfläche, dessen Fleck vom Auerlicht erleuchtet wurde. Die Strahlen des Auerlichts passierten zwei passend ausgesuchte blaue Glasscheiben, sowie eine bestimmte Schicht einer Karminlösung von bestimmter Konzentration, welche zusammen die Qualität des Auerlichts so änderten, dafs sie dem durch Episkotister entsprechend verdunkelten Vergleichslicht genau gleich kam.

Die Untersuchungen wurden am grofsen HELMHOLTZschen Farbenmischapparat des hiesigen Instituts ausgeführt. Als Lichtquelle für das Spektrum diente ein Triplexgasbrenner von SCHMIDT u. HAENSCH; durch die photometrischen Untersuchungen von KÖTTGEN[2] ist die spektrale Helligkeitsverteilung für diese Lichtquelle festgestellt, so dafs leicht Umrechnungen für andere Lichtquellen angestellt werden können. Zur Bestimmung der Komplementärfarben wurde der Kollimator sowie seine Doppelspatstellungen sorgfältig geaicht; auf die Einzelheiten einzugehen, erscheint nicht nötig; es sei nur erwähnt, dafs es der Einrichtung des Apparates nach unmöglich war, dem langwelligen Anteil in allen Versuchsreihen immer genau gleiche Qualität zu geben, wodurch die Versuche übersichtlicher geworden wären. Bei Verschiebung des Doppelspates, durch welche die Komponenten der Mischung geändert wurden, verschiebt sich nämlich nicht nur der ordinäre Strahl, der den kurzwelligen Mischungsanteil liefert, sondern auch der extraordinäre, wenn auch nur in geringem Betrage. Bei feststehender Kollimatorstellung wurde deshalb bei Aufsuchen der kurzwelligen Komplementärfarbe gleichzeitig der langwellige Anteil geändert. Mehr wie eine Beeinträchtigung der Übersichtlichkeit ist hierin natürlich nicht zu sehen.

Die Versuche wurden so ausgeführt, dafs für verschiedene Kollimatorstellungen von jedem Beobachter 3 mal hintereinander die Doppelspatstellung (Änderung der Wellenlängen) und Nicolstellung (Änderung des Mengenverhältnisses) aufgesucht wurden,

---

[1] Bei dem verwendeten Prisma war die Totalreflexion nicht durch Versilberung sondern durch Anätzung erzielt, so dafs Qualitätsänderung des Lichtes bei der Reflexion nicht eintrat.

[2] KÖTTGEN, E. Untersuchungen der spektralen Zusammensetzung verschiedener Lichtquellen. WIEDEMANNS Ann. d. Phys. u. Chem. N. F. 53. 793—811. 1894.

bei welcher die Mischung dem Vergleichsweifs gleich war, welches mit Hilfe der Königschen Vorrichtung im Gesichtsfeld unmittelbar neben die Mischung verlegt wurde. Aus den genannten drei Werten wurde das Mittel genommen, so dafs jede der unten mitzuteilenden Wellenlängen und Mengenverhältnisse das Mittel aus drei Einstellungen darstellt.

Die Feldgröfse betrug bei allen Versuchen 1,5°, die Fixation war zentral; beobachtet wurde mit Helladaptation, welche dadurch erzielt wurde, dafs man zwischen den Einstellungen an eine Magnesiumoxydfläche blickte, die aus ca. 20 cm Entfernung durch eine Auerlampe beleuchtet war. Beide Beobachter benutzten stets das rechte Auge.

Die Mengenverhältnisse der Komplementärfarben waren aus den Nicolstellungen zu berechnen, die Menge des langwelligen Anteils war proportional dem $\cos^2$ des Einstellungswinkels, die des kurzwelligen dem $\sin^2$. Dann war aber noch das Helligkeitsverhältnis des extraordinären und ordinären Spektrums in Rechnung zu ziehen, welches im betreffenden Kollimator unseres Apparats nicht gleich 1 ist. Vielmehr war das Spektrum des ordinären Strahls im Natriumlicht 1,343 mal so hell wie das des extraordinären. Mit diesem Werte waren die $\sin^2 \alpha$ zu multiplizieren. Für alle Bestimmungen wurde dann ferner die Menge des langwelligen Bestandteils gleich 1 gesetzt.

Die Helligkeit der Gesamtmischung hängt von der „scheinbaren Helligkeit" der Komponenten ab, wechselt also mit dieser. Die Differenz läfst sich entweder so ausgleichen, dafs die Helligkeit des Vergleichsweifs entsprechend abgestuft wird, oder die Weite des Kollimatorspaltes, wodurch beide Komplementärfarben in gleichem Mafse in ihrer Helligkeit verändert werden, eine Änderung des Farbentons also nicht erfolgt. Wir benutzten letztere Methode, bei der die reziproken Werte der eingestellten Spaltweiten der Helligkeit der Weifsmischung proportional sind.

In folgenden Tabellen I u. II sind die Versuchsresultate wiedergegeben. Man findet in Tabelle I für jeden Beobachter je 5 Reihen für zentrale Beobachtung. Die erste Spalte gibt die Stellung des Kollimators, sie soll lediglich zur besseren Orientierung über die in den einzelnen Reihen annähernd zusammengehörigen Werte dienen. In der zweiten Spalte folgt die Wellenlänge des langwelligen, in der dritten die des kurzwelligen Komplementärlichtes, weiter in der vierten das berechnete Mengen-

Tabelle I.

(Kollimator)	a) ANGIER: Wellenlängen d. Komplementärfarben, langwellig $= \lambda_1$	a) ANGIER: Wellenlängen d. Komplementärfarben, kurzwellig $= \lambda_2$	a) ANGIER: Mengenverhältnis $\lambda_1 : \lambda_2$	a) ANGIER: Helligkeit der Weifsmischung	b) TRENDELENBURG: Wellenlängen d. Komplementärfarben, langwellig $= \lambda_1$	b) TRENDELENBURG: Wellenlängen d. Komplementärfarben, kurzwellig $= \lambda_2$	b) TRENDELENBURG: Mengenverhältnis $\lambda_1 : \lambda_2$	b) TRENDELENBURG: Helligkeit der Weifsmischung
Reihe Nr. I:								
(1)	669,1	489,6	1 : 11,377	12,1	669,3	490,9	1 : 10,576	14,0
(2)	—	—	—	—	—	—	—	—
(3)	641,2	490,5	1 : 29,710	15,8	641,2	490,5	1 : 25,823	18,1
(4)	628,1	487,1	1 : 42,290	15,7	628,5	489,7	1 : 38,490	17,0
(5)	616,0	486,7	1 : 45,070	14,5	616,5	489,5	1 : 40,339	18,2
(6)	604,8	487,5	1 : 38,486	16,0	605,1	489,1	1 : 37,062	19,1
(7)	593,8	484,6	1 : 29,035	17,2	594,1	486,6	1 : 24,386	23,6
(8)	583,1	478,9	1 : 23,156	20,2	583,5	482,5	1 : 18,101	27,0
(9)	—	—	—	—	—	—	—	—
Reihe Nr. II:								
(1)	669,2	489,9	1 : 6,883	15,7	669,4	491,3	1 : 6,967	18,6
(2)	—	—	—	—	—	—	—	—
(3)	640,9	488,5	1 : 27,865	15,9	641,1	488,1	1 : 27,865	16,7
(4)	628,0	487,1	1 : 41,675	17,5	628,2	488,2	1 : 40,837	17,2
(5)	616,3	487,6	1 : 39,778	17,5	615,9	486,2	1 : 45,208	15,8
(6)	604,6	485,7	1 : 39,243	17,1	604,7	486,4	1 : 41,414	17,1
(7)	593,6	483,1	1 : 32,970	17,2	593,7	483,8	1 : 31,262	18,7
(8)	583,1	478,1	1 : 20,435	17,4	583,3	480,4	1 : 21,175	21,3
(9)	—	—	—	—	—	—	—	—
Reihe Nr. III:								
(1)	669,5	491,7	1 : 7,950	17,0	669,4	491,5	1 : 8,795	16,7
(2)	—	—	—	—	—	—	—	—
(3)	640,9	489,0	1 : 28,344	15,1	641,2	490,2	1 : 30,214	15,6
(4)	628,2	488,3	1 : 42,290	15,0	628,5	490,2	1 : 37,984	16,8
(5)	616,1	486,9	1 : 48,141	14,1	616,1	487,4	1 : 50,755	14,9
(6)	604,9	488,3	1 : 37,551	16,9	604,8	486,8	1 : 44,307	17,0
(7)	593,8	484,6	1 : 31,589	17,3	593,9	485,6	1 : 34,215	18,0
(8)	583,3	480,7	1 : 23,263	19,5	583,6	483,4	1 : 21,698	22,4
(9)	573,9	481,6	1 : 14,065	21,8	573,0	474,0	1 : 14,246	21,8
Reihe Nr. IV:								
(1)	669,6	492,5	1 : 7,381	17,4	669,6	492,0	1 : 7,926	17,7
(2)	654,7	489,1	1 : 17,854	16,8	655,0	490,9	1 : 17,514	16,4
(3)	641,5	491,9	1 : 24,381	21,5	641,6	493,3	1 : 23,997	21,9
(4)	628,2	488,6	1 : 41,675	16,2	628,5	489,8	1 : 38,782	16,6
(5)	616,0	486,2	1 : 51,447	14,2	616,0	486,6	1 : 46,829	16,6
(6)	604,7	486,2	1 : 41,675	16,8	604,7	486,5	1 : 39,553	16,2
(7)	594,1	486,7	1 : 29,709	22,0	594,2	488,4	1 : 28,344	21,5
(8)	583,6	483,6	1 : 22,235	21,6	583,6	483,6	1 : 19,967	22,8
(9)	572,5	470,0	1 : 14,549	24,5	572,2	467,3	1 : 8,936	35,1
Reihe Nr. V:								
(1)	669,3	490,8	1 : 10,363	15,2	669,3	490,5	1 : 11,946	16,3
(2)	654,5	488,8	1 : 18,707	14,1	654,8	490,0	1 : 20,138	14,6
(3)	641,3	491,2	1 : 25,303	16,2	641,2	490,1	1 : 28,057	15,3
(4)	628,2	488,4	1 : 38,783	17,0	628,2	488,0	1 : 43,785	14,3
(5)	616,4	489,5	1 : 37,766	15,4	616,5	489,7	1 : 39,012	16,5
(6)	604,8	487,4	1 : 37,766	13,6	604,8	487,6	1 : 39,243	14,4
(7)	593,8	484,5	1 : 34,883	13,5	593,8	484,3	1 : 34,673	14,2
(8)	583,4	481,9	1 : 21,817	17,2	583,7	484,1	1 : 18,880	18,5
(9)	572,3	468,2	1 : 13,502	17,5	572,0	465,9	1 : 12,155	17,3

Tabelle II.

Mittelwerte der Reihen I—V.

	a) Angier				b) Trendelenburg			
(Kollimator)	Wellenlängen d. Komplementärfarben langwellig $= \lambda_1$	Wellenlängen d. Komplementärfarben kurzwellig $= \lambda_2$	Mengenverhältnis $\lambda_1 : \lambda_2$	Helligkeit der Weifsmischung	Wellenlängen d. Komplementärfarben langwellig $= \lambda_1$	Wellenlängen d. Komplementärfarben kurzwellig $= \lambda_2$	Mengenverhältnis $\lambda_1 : \lambda_2$	Helligkeit der Weifsmischung
(1)	669,3	490,9	1 : 8,791	15,5	669,4	491,2	1 : 9,242	16,7
(2)	654,6	489,0	1 : 18,281	15,5	654,9	490,5	1 : 18,826	15,5
(3)	641,2	490,2	1 : 27,121	16,9	641,3	490,4	1 : 27,191	17,5
(4)	628,1	487,9	1 : 41,343	16,3	628,4	489,2	1 : 39,976	16,4
(5)	616,2	487,4	1 : 44,440	15,1	616,2	487,9	1 : 44,429	16,4
(6)	604,8	487,0	1 : 38,944	16,1	604,8	487,3	1 : 40,316	16,7
(7)	593,8	484,7	1 : 31,637	17,4	593,9	485,7	1 : 30,576	19,2
(8)	583,3	480,6	1 : 22,181	19,2	583,5	482,8	1 : 19,964	22,4
(9)	572,9	473,3	1 : 14,039	21,3	572,4	469,1	1 : 11,779	24,7

verhältnis des langwelligen Mischungsanteils zum kurzwelligen und schliefslich sind in der fünften Reihe die (mit 1000 multiplizierten) reziproken Werte der Weiten des Kollimatorspaltes enthalten. In den 3 ersten Versuchsreihen wurden noch einige Kollimatorstellungen ausgelassen, wie durch Striche angedeutet ist.

Von den Beobachtungen sind Mittelwerte berechnet worden (Tabelle II), obwohl aus dem angeführten Grunde das langwellige Licht nicht für alle Reihen fest fixiert werden konnte. Jedoch sind die Abweichungen so gering, dafs es berechtigt erscheint, Mittelwerte zu ziehen. Vergleicht man die Mittelwerte der Komplementärfarben beider Beobachter, so findet man bei A. im allgemeinen den kurzwelligen Bestandteil von etwas kleinerer Wellenlänge als bei T., was mit kleinen Differenzen der Stärke der Maculafärbung zusammenhängen wird. Weit gröfsere Unterschiede haben früher v. Frey und v. Kries gefunden.

Anschliefsend an die Reihen mit zentraler Beobachtung haben wir ferner eine Anzahl von Reihen mit parazentraler Beobachtung ausgeführt, um den Einflufs der Maculapigmentierung auszuschliefsen. Dem stellten sich aber unter den vorliegenden Versuchsbedingungen Schwierigkeiten entgegen, die besonders von der geringen Lichtstärke der Mischungen herrührten. Durch Vergröfserung der Spaltweiten hätte sich die Lichtstärke erhöhen lassen, doch hätte man dann mit zu unreinem Spektrum arbeiten müssen. Andererseits wurde dem Spektrum des Gaslichts vor

dem anderer künstlicher Lichtquellen von gröfserer Helligkeit der Vorzug gegeben, weil es physikalisch gut bekannt ist. So waren die parazentralen Einstellungen schon bei 2° Abstand und 1,5° Feldgröfse bedeutend erschwert, besonders wurde ein zeitweises Verschwinden und Wiederauftauchen der Farbenempfindung bei nicht völlig richtiger Einstellung als sehr störend empfunden. Zudem scheint zwischen den parazentralen Reihen sich das Vergleichsweifs etwas verändert zu haben, aus nicht näher angebbarem Grunde. Wir unterlassen deshalb eine Wiedergabe dieser Reihen; sollte für bestimmte Zwecke ein genauer Vergleich zentraler und parazentraler Komplementärmischungen nötig sein, so würde sich das Spektrum einer helleren Lichtquelle mehr empfehlen.

Wir haben die älteren Beobachtungen von v. Frey und v. Kries nach erforderlicher Umrechnung auf das Gaslichtspektrum mit unseren Werten verglichen und etwas höhere Mengenwerte für die kurzwelligen Lichter bei diesen Untersuchern gefunden. Doch kann eine derartige Umrechnung niemals ganz zutreffen, da die Qualität des Vergleichslichts und des das Spektrum liefernden Wolkenlichts, welches die genannten Autoren verwendeten, nicht genügend in Rechnung gezogen werden können.

Von gröfserem Wert ist es, die von König bestimmten Werte mit den unseren zu vergleichen. König[1] verwendete ein $1^1/_3{}^0$ grofses Feld, das etwa 3° unter dem Fixationspunkt lag. Als Vergleichsweifs diente das Licht einer Auerlampe, das durch Farbenfilter dem Sonnenlicht gleich gemacht war. Die in der folgenden Tabelle III gegebene Berechnung der Mengenverhältnisse zeigt den unseren sehr ähnliche Werte. Der Vergleich bestätigt die Annahme, dafs jedenfalls auch König die Mengenverhältnisse für das Spektrum des Triplexgaslichts feststellte.

Schliefslich haben wir unsere Werte noch mit den Rot- und Blauwerten verglichen, welche v. Kries[2] für Dichromaten feststellte. Da die Farbengleichungen, also auch Komplementär gemische, des normalen Trichromaten für den Dichromaten beider Typen ebenfalls gültig sind, mufs sich auch rechnerisch diese Beziehung zwischen unseren Weifsgleichungen und den „Rot-

[1] Ges. Abh. S. 375.

[2] v. Kries, J.: Über Farbensysteme. *Diese Zeitschr.* 13, S. 241—324. Darin S. 252. Abh z. Physiol. d. Gesichtsempf. I, S. 116.

Tabelle III.

Mengenverhältnisse komplementärer Lichter nach König.

Langwelliges Licht λ_1	kurzwelliges Licht λ_2	Menge des langwelligen Lichts a	Menge des kurzwelligen Lichts b	Mengenverhältnis des langwelligen zum kurzwelligen Lichte a : b
681,8	490,1	0,365	1,871	1 : 5,13
663,7	490,0	0,137	1,985	1 : 14,49
645,9	489,7	0,0750	1,955	1 : 26,01
629,7	489,2	0,0608	2,081	1 : 34,23
614,7	488,3	0,0415	1,753	1 : 42,24
601,2	486,9	0,0692	1,890	1 : 27,31
588,9	484,6	0,0828	2,192	1 : 26,47
578,4	478,2	0,106	1,711	1 : 16,14
570,8	462,5	0,153	2,350	1 : 15,36
568,2	436,8	0,164	4,817	1 : 29,37
567,9	422,2	0,171	18,83	1 : 110,12

(Die Zahlen der vier ersten Vertikalspalten sind der Königschen Tabelle entnommen. Es sei bemerkt, dafs in der Tabelle der „Gesammelten Abhandlungen“ S. 375 in der 6. Vertikalreihe unten statt 1,883 die Zahl 18,83 stehen mufs; s. d. Originalabhandlung.)

werten“ der Protanopen und Deuteranopen und ihren „Blauwerten“ feststellen lassen. Im folgenden mögen die Rotwerte der Protanopen als „Grünwerte“ bezeichnet werden, weil sie als eine Funktion der Grünkomponente des protanopischen Farbensystems anzusehen sind und die Darstellung dadurch vereinfacht wird. Die Rotwerte der Deuteranopen seien, als Ausdruck der Rotkomponente, einfach als „Rotwerte“ bezeichnet. Berechnet man nun für jede unserer einzelnen Weifsgleichungen die Summe der Rotwerte des langwelligen und des kurzwelligen Mischungsanteils unter Berücksichtigung des gefundenen Mengenverhältnisses, so mufs diese Summe für jede der Weifsmischungen konstant sein; das gleiche mufs für die Summe der Grün- und Blauwerte der Fall sein, so dafs im ganzen für alle Weifsgleichungen die Summen der Rot-, Grün- und Blauwerte des lang- und kurzwelligen Mischungsanteils konstant sein müssen. Denn nur dann kann die Mischung jedesmal von gleichem Farbenton sein. Die Berechnungen wurden durchgeführt an den Mittelwerten des Beobachters T. (s. Tabelle II); die Mengenverhältnisse waren zunächst in $\sin^2$ und $\cos^2$ umzurechnen, d. h. so, dafs ihre

Summe 1 beträgt, während sie im vorigen lediglich als Verhältniszahlen aufgeführt wurden. Die Rot-, Grün- und Blauwerte wurden aus der v. Kriesschen Tabelle für die Wellenlängen unserer Weifsmischungen interpoliert. Es bleibt einigermafsen willkürlich, welche der dort mitgeteilten Werte, die wegen verschiedener Maculatingierung bei den einzelnen Beobachtern etwas differieren, zugrunde zu legen waren; wir nahmen die Mittelwerte aus allen Reihen. Dann waren die Rot-, Grün- und Blauwerte des langwelligen Anteils unserer Weifsmischungen mit dem $\cos^2$, die des kurzwelligen mit dem $\sin^2$ zu multiplizieren; jede der Summen der Rot-, Grün- oder Blauwerte war ferner mit der bei der Weifsgleichung vorhandenen Spaltweite zu multiplizieren.

Die folgende Tabelle IV enthält im 1. Stab die Nummer der Weifsgleichung; im 2. und 3. die Wellenlängen der Komplementärfarben; im 4. mit A bezeichneten die Spaltweiten; im folgenden Stab B die $\cos^2$, in C die $\sin^2$; es folgen in D, E und F die Rot-, Grün- und Blauwerte des langwelligen Anteils λ_1 der Weifsmischungen. Im unteren Teil der Tabelle, welcher an das rechte Ende des oberen anschliefst, sind zunächst wieder die Nummern der Weifsmischungen, sodann in G, H und I die Rot-, Grün- und Blauwerte des kurzwelligen Mischungsanteils λ_2, weiter in K, L und M die Summen der Rotwerte, Grünwerte und Blauwerte für λ_1 und λ_2 unter Berücksichtigung der Mengenverhältnisse und Spaltweiten angegeben; eine Orientierung über die Rechnung gibt die über jedem Stab stehende Gleichung, deren Buchstaben sich auf die Benennungen der vorigen Vertikalreihen beziehen. Man erkennt aus den drei letzten Spalten die geforderte Konstanz der Werte; dafs diese keine absolute sein kann, folgt schon aus der Unmöglichkeit, die Verschiedenheit der Maculatingierung genügend zu berücksichtigen.

Wir möchten in dem Nachweis dieser Übereinstimmung nicht nur eine Probe unserer Weifsgleichungen erblicken, sondern auch eine weitere Bestätigung der Ansicht, dafs die **dichromatischen Systeme** als **Reduktionsformen** des normalen trichromatischen Systems aufgefafst werden müssen. Hierin schliefst sich unsere Berechnung an den Nachweis von v. Kries[1]

[1] v. Kries, J.: Über Farbensysteme, *diese Zeitschrift* 13, S. 281. Abh. etc. I, S. 145.

an, dafs die aus normal-trichromatischen Farbengleichungen (zwischen λ 670,8 und λ 552) berechneten Rotwerte der Protanopen und Deuteranopen sich mit denen decken, welche an diesen letzteren Farbensystemen direkt bestimmt wurden.

Tabelle IV.

Vergleich der Mittelwerte des Beobachters T. (s. Tabelle II) mit den Einstellungen von Dichromaten (v. Kries, Abh. S. 116).

	Komplementärfarben λ_1	Komplementärfarben λ_2	Spaltweite	Menge von λ_1 (= cos²)	Menge von λ_2 (= sin²)	Rotwert für λ_1	Grünwert für λ_1	Blauwert für λ_1
(1)	669,4	491,2	59,9	0,09764	0,90236	35,0	5,45	—
(2)	654,9	490,5	64,5	0,05044	0,94956	54,93	9,52	—
(3)	641,3	490,4	57,1	0,03547	0,96453	88,48	19,49	—
(4)	628,4	489,2	61,0	0,02440	0,97560	115,66	37,69	—
(5)	616,2	487,9	61,0	0,02201	0,97799	140,1	60,72	—
(6)	604,8	487,3	60,0	0,02420	0,97580	151,57	83,4	—
(7)	593,9	485,7	52,1	0,03167	0,96833	143,52	102,17	—
(8)	583,5	482,8	44,6	0,04770	0,95230	130,0	110,75	—
(9)	572,4	469,1	40,5	0,07825	0,92175	108,44	121,46	—
			A	B	C	D	E	F

	Rotwert für λ_2	Grünwert für λ_2	Blauwert für λ_2	Σ Rotwerte = (D·B + G·C)A	Σ Grünwerte = (E·B + H·C)A	Σ Blauwerte = (J·C)A
(1)	2,61	4,89	51,33	303,7	296,2	2774,5
(2)	2,422	4,64	52,46	327,3	315,2	3213,0
(3)	2,395	4,605	52,62	333,2	293,1	2898,0
(4)	2,073	4,178	54,56	295,5	304,7	3246,3
(5)	1,739	3,727	56,630	291,9	303,9	3378,4
(6)	1,676	3,588	57,419	318,2	331,2	3361,7
(7)	1,505	3,218	59,519	312,7	330,9	3002,7
(8)	1,198	2,548	63,325	327,5	343,8	2689,6
(9)	0,305	0,66	67,892	355,1	409,6	2534,5
	G	H	I	K	L	M

(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Über Minimalfeldhelligkeiten.

Von

cand. med. RICHARD SIEBECK.

Die Helligkeitsvergleichung verschiedenfarbiger Lichter ist eine Aufgabe, die nicht nur mit sehr verschiedenen technischen Hilfsmitteln in Angriff genommen, sondern insbesondere auch hinsichtlich ihres Sinnes verschieden aufgefafst werden kann. Einerseits kann davon ausgegangen werden, dafs optische Empfindungen, die in bezug auf ihre Farbe verschieden sind, doch hinsichtlich der Helligkeit in gewisser Weise vergleichbar erscheinen. Die auf dieser Grundlage beruhenden Untersuchungen sind mit einer Reihe von Bedenken und Schwierigkeiten theoretisch-psychologischer Natur behaftet, auf die hier nicht eingegangen werden soll. Wesentlich einfacher ist die andere Klasse von Beobachtungen, die darauf ausgeht, die Helligkeiten verschiedenartiger Lichter dann zu vergleichen, wenn zufolge irgendwelcher besonderer physiologischer Verhältnisse die Farbenempfindung ausgefallen ist, die Lichter also durchweg farblos gesehen werden. Da hier die Verschiedenfarbigkeit im subjektiven Sinne gar nicht vorhanden ist, so ist auch die Helligkeitsvergleichung durchaus einwandsfrei. Werden unter irgendwelchen Bedingungen alle (auch reine spektrale) Lichter farblos gesehen, so charakterisiert sich die hier gegebene Funktionsweise des Sehorgans durch eine bestimmte Abhängigkeit der Helligkeit von der Wellenlänge oder eine bestimmte Helligkeitsverteilung in einem Spektrum. Es versteht sich dabei keineswegs von selbst, dafs diese bei allen zu einem Ausfall der Farben führenden Bedingungen die nämliche sein mufs. Für das normale Sehorgan sind bis jetzt zwei Arten solchen Sehens und die ihnen ent-

sprechende Helligkeitsverteilung untersucht worden, nämlich das Sehen des dunkeladaptierten Auges bei geringen Lichtstärken (Dämmerungssehen) und dasjenige, das der äufsersten Peripherie des nasalen Gesichtsfeldes (in helladaptiertem Zustande) zukommt. Die Tatsache, dafs die Helligkeitsverhältnisse in diesen beiden Fällen durchaus verschiedene sind, die Dämmerungswerte eine ganz andere Verteilung im Spektrum aufweisen als die Peripheriewerte, hat bekanntlich eine erhebliche theoretische Bedeutung gewonnen. Allgemein kann man wohl sagen, dafs die Untersuchung weiterer Fälle ähnlicher Art von Interesse sein wird. Ich folgte daher gern dem Vorschlag von Herrn Professor v. Kries, das Sehen unter gewissen Bedingungen zu untersuchen, bei denen, wie sich vermuten liefs, gleichfalls ein Ausfallen der Farbenempfindung jedoch auf wiederum andere Art zu erzielen sein konnte. Es handelt sich hier um die Beobachtung von farbigen Feldern sehr geringer Ausdehnung. Aus den Beobachtungen von Donders, Wittich u. a. ist bekannt, dafs farbige Objekte, wenn sie unter sehr kleinem Gesichtswinkel gesehen werden, keine Farbe mehr erkennen lassen, sondern je nach der Helligkeit des umgebenden Grundes als helle oder dunkle Flecke wahrgenommen werden. Hiernach ist zu erwarten, und der Versuch bestätigt es leicht, dafs für ein solches sehr kleines farbiges Objekt auch immer eine gewisse (farblose) Helligkeit der Umgebung gefunden werden kann, bei der es weder als heller noch als dunkler Punkt gesehen, sondern ganz unsichtbar wird. Wir können diese als diejenige Helligkeit betrachten, die dem farbigen Objekte selbst zukommt, wenn die Farbe durch die Reduktion der Feldgröfse zum Verschwinden gebracht wird. Sie mag, um, analog den Bezeichnungen der Dämmerungs- und Peripheriewerte, eine von keiner theoretischen Deutung ausgehende, rein empirische Bezeichnung zu haben, als die Minimalfeldhelligkeit des betr. farbigen Lichtes bezeichnet werden.[1]

Um die Abhängigkeit der Minimalfeldhelligkeiten von der Wellenlänge oder ihre Verteilung in einem bestimmten Spektrum kennen zu lernen, konnte ein Verfahren eingeschlagen werden,

[1] Die Benutzung sehr kleiner Felder zur Helligkeitsvergleichung verschiedenfarbiger Lichter ist ähnlich, wenn auch von etwas anderen theoretischen Gesichtspunkten ausgehend, schon von Brücke vorgeschlagen worden.

das sich dem von v. KRIES zur Bestimmung der Peripheriewerte angewendeten durchaus anschlofs. Da die Anordnung sich von der früheren in einigen technischen Beziehungen unterschied, so erläutere ich meine Versuchsanordnung noch kurz an der Hand der nachstehenden Skizze.

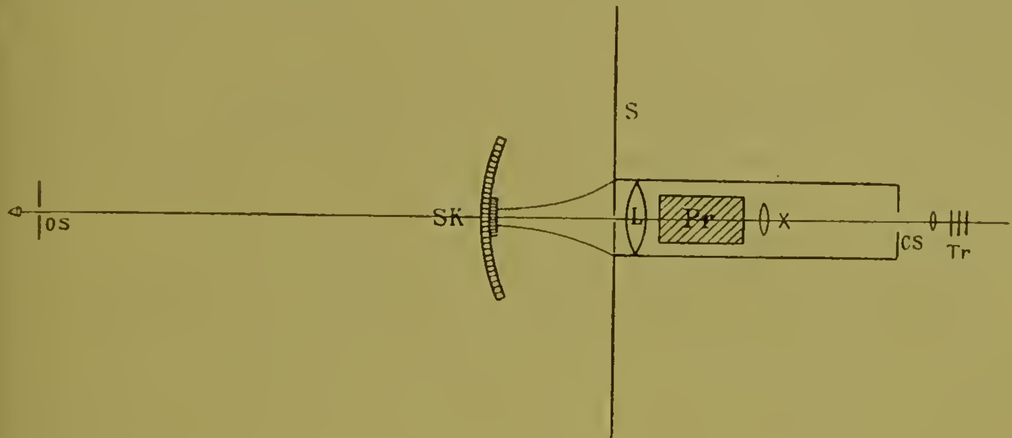


Fig. 1.
Schema der Versuchsanordnung. Erklärung im Text.

Der Spalt des Kollimatorrohres (*CS*) wurde durch den Triplexbrenner (*Tr*) beleuchtet, an Stelle dessen allerdings bei der Untersuchung kurzwelliger Lichter in später zu erörternder Weise ein Auerbrenner treten mufste. Durch die Objektivlinse (*L*) vor dem geradsichtigen Glasprisma (*Pr*) wurde in 1 m Entfernung, wo sich ein 1,3 mm breiter Okularspalt (*OS*) befand, ein reelles, etwa 9 cm langes Spektrum entworfen. Vor der Objektivlinse war eine zur Abblendung auf der Rückseite mit Stanniol überzogene, weifse Kartonscheibe (*S*) angebracht und derart mit dem Apparat verbunden, dafs nirgends fremdes Licht eindringen konnte. In die Mitte dieser Scheibe war mit einer Nadel ein rundes Loch, dessen Durchmesser 0,6 mm betrug, gestofsen.

Auf diese Weise sah der Beobachter durch den Okularspalt auf dem weifsen Grunde der Scheibe einen kleinen farbigen Fleck. Seine Helligkeit wurde reguliert durch Variierung des Kollimatorspaltes, an dessen Schraube eine in 100 Teilstriche geteilte Scheibe angebracht war und der bei einer Umdrehung 1 mm weit war. Die Regulierung erfolgte vom Beobachter aus mittels Schnurlaufs. Durch Verschiebung des Spektrums, die bei feststehendem Okularspalte durch Drehung des ganzen Beleuchtungsapparates erreicht und durch Ablesung der Skala (*Sk*)

zahlenmäſsig bestimmt wurde, konnte der Fleck mit verschiedenfarbigem homogenem Lichte erleuchtet werden.

Um die Wellenlängen der benutzten Lichter zu kennen. muſste man den Apparat eichen. Der Kollimatorspalt wurde abwechselnd mit Natrium-, Lithium-, Thallium- und Strontiumlicht beleuchtet und bei Einstellung der betreffenden Linien die Skala abgelesen. Wurde für die Natriumlinie ($\lambda = 589{,}3\ \mu\mu$) der Nullpunkt der Skala angenommen, so befand sich die Lithiumlinie ($\lambda = 670{,}8\ \mu\mu$) bei $-$ 2,3, die Thalliumlinie ($\lambda = 534{,}9\ \mu\mu$) bei $+$ 2,4, die Strontium-(δ)-linie ($\lambda = 460{,}7\ \mu\mu$) bei $+$ 8. Aus den so gewonnenen Zahlen konnte nach der Cauchyschen Interpolationsformel die ganze Skala bestimmt werden.

Erst die Versuche selbst konnten ergeben, ob es gelingt, der das spektrale Licht durchlassenden Öffnung solche Dimensionen zu geben, daſs ein Ausfall der Farbenempfindungen für genau zentrale Fixation oder für kleine Fovealabstände (parazentrale Beobachtung) erzielt wird; ferner auch, ob bei einer für das Verschwinden der Farbe erforderlichen Reduzierung der Feldgröſsen noch eine für unsere Zwecke hinreichend genaue Vergleichung der Helligkeiten stattfinden kann, ob also Beobachtungen der beabsichtigten Art überhaupt möglich sind.

Die ersten orientierenden Versuche lehrten sogleich, daſs dies für wirkliche Fixation nicht der Fall ist. Wie sich nämlich von selbst versteht, darf mit der Gröſse des farbigen Feldes nicht unter einen gewissen Betrag herunter gegangen werden, da bei noch weiterer Verkleinerung aus dioptrischen Gründen Unsicherheiten und Fehlerquellen in das Verfahren hineinkommen würden. Bei einer Feldgröſse von ca. 2′, deren weitere Verminderung aus diesem Grunde nicht ratsam erschien, übrigens auch auf technische Schwierigkeiten gestoſsen wäre, verschwinden nun die Farben bei zentraler Fixation noch keineswegs und Einstellungen der beabsichtigten Art sind also unmöglich. Dagegen zeigte sich auch sogleich, daſs schon bei sehr geringen Exzentrizitäten der Farbensinn so weit hinter dem höchsten zentralen zurückbleibt, daſs die gewünschte Erscheinung bei passenden und noch zulässigen Feldgröſsen erreicht werden kann. Auch zeigte sich, daſs hier das Verschwinden des Flecks bei einer bestimmten und mit genügender Schärfe einzustellenden Helligkeit stattfindet, somit eine Ermittlung der Minimalfeldhelligkeit in der Tat ohne Schwierigkeit und recht genau ausführbar ist.

Die Wahl der Feldgröfse ist natürlich in gewissen Grenzen willkürlich, doch mufs, je gröfser man das Feld nimmt, um so gröfser auch die Exzentrizität der Beobachtung genommen werden. Ich entschied mich nach einigen Vorversuchen für eine Feldgröfse von 2′,1 (0,6 mm aus einer Entfernung von 1 m gesehen) und einen Zentralabstand[1] von 1⁰,5. Bei dieser Art des Verfahrens gelingen die Einstellungen fast genau in derselben Weise, wie sie bei gröfseren Feldern in den stark exzentrischen Teilen sich ausführen lassen. Man sieht wenigstens bei den meisten Lichtern den kleinen Fleck bei einer bestimmten Spaltweite verschwinden; wird der Spalt um ein geringes enger gemacht, so erscheint der Fleck als ein (farblos) dunkler auf dem helleren Grunde. Wird andererseits der Spalt über jenen Punkt erweitert, so erscheint der Fleck hell; in diesem Falle wird dann allerdings in der Regel alsbald auch die Farbendifferenz bemerklich.[2]

Hinsichtlich der Ausführung der Versuche ist noch zu erwähnen, dafs die weifse Scheibe, die mit dem spektralen Fleck auszugleichen war, stets von diffusem Tageslichte beleuchtet wurde. Da natürlich auch bei der Beschränkung auf günstige Lichtverhältnisse eine vollständige Konstanz dieser Beleuchtung niemals angenommen werden konnte, so mufste auch hier so verfahren werden, dafs die Bestimmung jedes einzelnen Lichtes zwischen zwei Bestimmungen des Na-Lichtes eingeschaltet wurde; bei genügender Übereinstimmung der vorausgehenden und der nachfolgenden Werte für Na-Licht ergab sich dann ein brauchbarer Wert für das Helligkeitsverhältnis des in der Zwischenzeit

---

[1] Eine genaue Fixation war für die Zwecke der Versuche nicht erforderlich, würde dieselben im Gegenteil sehr beeinträchtigt haben; vielmehr kam es nur darauf an, dafs das Objekt dauernd in gleichem Zentralabstand gesehen wurde. Aus diesem Grunde wurde nicht eine punktförmige Fixationsmarke benutzt, sondern eine kurze Linie, deren Richtung senkrecht gegen die Verbindung ihrer Mitte mit dem Objektpunkt zu wählen war. Meist lag die Fixationslinie u n t e r dem kleinen Farbenfelde und hatte demgemäfs horizontale Richtung.

[2] In einigen Fällen habe ich ein ganz vollkommenes Verschwinden des Flecks allerdings nicht erzielen können, doch war auch hier das Dunkler- und Hellererscheinen bei geringen Änderungen des Spalts mit solcher Schärfe wahrnehmbar, dafs die Einstellungen mit grofser Genauigkeit möglich waren und eine Verkleinerung der Felder oder Vergröfserung der Exzentrizität mir nicht ratsam erschien.

bestimmten zum Na-Lichte. Jede solche Bestimmung bestand dabei aus drei einzelnen Einstellungen.

Da die meisten physiologischen Ermittlungen der hier in Betracht kommenden Art sich auf gewöhnliches Gaslicht (Triplexbrenner) beziehen und dies von allen überhaupt brauchbaren Lichtarten wohl auch das konstanteste und am besten definierte ist, so habe ich auch für meine Versuche dies in erster Linie verwendet. Die Resultate dieser Beobachtungen enthält die folgende ohne weitere Erläuterung verständliche Tabelle.

Tabelle I. Helligkeitswerte.

I. Versuche bei Triplexbeleuchtung.

Spektral. Ort u. Wellenlänge des homogenen Lichtes		I. 3. V. 1904	II. 4. V.	III. 6. V.	IV. 9. V.	V. 11. V.	VI. 14. V.	VII. 16. V.	VIII. 17. V.	Durchschnittswerte
— 2	658,0 μμ	51,6		45,2		27,9		43,6	56,4	44,9
1,8	650,1 „	68,6		49,5		45,5		60,9	58,9	56,7
1,6	642,4 „	64,9		72,3		53,7		72,8	69,1	66,6
1,4	635,0 „	68,3		72,1		67,8		79	73,4	72,1
1,2	627,8 „	82,7		80,9		82,1		86,5	88,7	84,2
1	620,8 „	85,2	81,8	84,7	91,5	92,1		99,1	105,8	91,5
0,8	614,2 „	90,3	117,9	101,9	109,7	94,2		106,8	109,1	104,3
0,6	607,6 „	71,9	119,9	129,2	112,5	103,3		122,7	129,8	112,8
0,4	601,3 „	124,4	108	145,6	135,6	117,5		125,2	139,6	128
0,2	595,2 „	102,9	104,5	122,2	116,3	112,3		105,8	112,5	110,9
Na 0	589,3 „	100	100	100	100	100	100	100	100	100
+ 0,2	584,2 „		86,7	96,9	101,2	85,5	84,6	85	90,1	90
0,4	579,1 „		67,4	83,7	94,5	85,1	72,8	82,3	85,6	81,6
0,6	574,1 „		79,4	81,5	83,1	79,2	72	78,4	82,8	79,5
0,8	569,3 „		67,9	63,9	79,4	70,8	73,9	75,5	78,6	72,9
1	564,8 „		62,3	64,4	71,5	69,5	69,1	71,7	71,7	68,6
1,2	560,1 „		59,7			58,2	68,6	66,6	60	62,6
1,4	556,4 „		54			57,7	63,7	60,3	56,9	58,5
1,6	551,4 „		42,9			53,2	55,5	54,5	54	52
1,8	547,2 „		39,3			52,2	49,4	48,8	46,9	47,3
+ 2	542,9 „		31,5			50,2	42,3	46	44	42,8

Eine Ausdehnung der Versuche auf kleinere Wellenlängen stieſs auf Schwierigkeiten, weil die Helligkeit im Triplexspektrum zu gering wird. Um meine Bestimmungen noch etwas weiter erstrecken zu können, habe ich mich des Auerlichtes bedient. Natürlich waren es nicht die Helligkeiten im Spektrum des Auerlichtes, die endgültig interessierten; vielmehr sollten diese nur als

Hilfsmittel dienen, um die Werte im Triplexspektrum zu ermitteln. Hierzu gelangte ich, indem ich die Bestimmung der Minimalfeldhelligkeiten für Lichter bis 460,7 $\mu\mu$ im Auerspektrum ausführte, aufserdem aber in direkter Weise die Intensitätsverteilung von Triplex- und Auerspektrum verglich. So konnten die Minimalfeldhelligkeiten für das Triplexspektrum in noch etwas gröfserer Ausdehnung (bis 460,7 $\mu\mu$) erhalten werden, die als indirekte oder berechnete bezeichnet werden können. Die so für eine Anzahl kleinerer Wellenlängen erhaltenen Werte zeigt Tabelle II.

Tabelle II.

Minimalfeldhelligkeiten im prismatischen Spektrum des Triplexlichtes (mit Benutzung des Auerlichtes berechnete Werte).

Spektral. Ort und Wellenlänge des homogenen Lichtes		mit Auerbrenner				
		I.	II.	III.	IV.	D.
+ 2	542,9 $\mu\mu$	33,7	37,4	36,1	34,9	35,5
+ 3	525,6 „	18,2	18	19,5		18,6
+ 4	510,6 „	9,9	10	8,8		9,6
+ 5	496,7 „	3,5	3,9			3,7
+ 6	483,7 „	1,8	1,9			1,8
+ 8	460,7 „	0,4	0,46			0,4

Ich darf indessen nicht verschweigen, dafs diese umgerechneten Werte bei den Lichtern 538,4, 526 und 511 $\mu\mu$, bei denen ich auch noch direkte Bestimmungen ausführen konnte, mit den direkt erhaltenen Werten nicht sehr gut übereinstimmen (hier wurden für die genannten 3 Lichter durchschnittlich die Werte 42,8, 24,7 und 13,9 gefunden). Ob hier die direkte Bestimmung wegen der grofsen Spaltweiten unsicher wurde oder ob durch die Vergleichungen von Triplex- und Auerlicht eine Fehlerquelle sich eingeschlichen hat, vermag ich nicht zu sagen. Jedenfalls sind die Werte für Wellenlängen unter 538 $\mu\mu$ weniger zuverlässig als die für die länger-welligen Lichter.

Als wesentliches Ergebnis meiner Beobachtungen kann der einfache Satz aufgestellt werden, dafs die Minimalfeldhelligkeiten für parazentrale Netzhautstellen mit gröfster Annäherung die gleiche Verteilung im Spektrum zeigen wie die Peripheriewerte (Maximum etwa bei 605 $\mu\mu$) also ebenso wie diese sich von den Dämmerungswerten durchaus verschieden verhalten. Wie bekannt

zeigen auch die Flimmerwerte und die Rotwerte der Deuteranopen eine ähnliche Abhängigkeit von der Wellenlänge. Ich habe, um diese Verhältnisse hervortreten zu lassen, in Fig. 2 die Peripheriewerte nach v. Kries, meine Minimalfeldhelligkeiten, die Flimmerwerte nach Polimanti, endlich die Rotwerte der Deuteranopen in der üblichen Weise zusammengezeichnet. Man sieht leicht, dafs alle 4 Kurven einen mindestens sehr ähnlichen Verlauf zeigen.

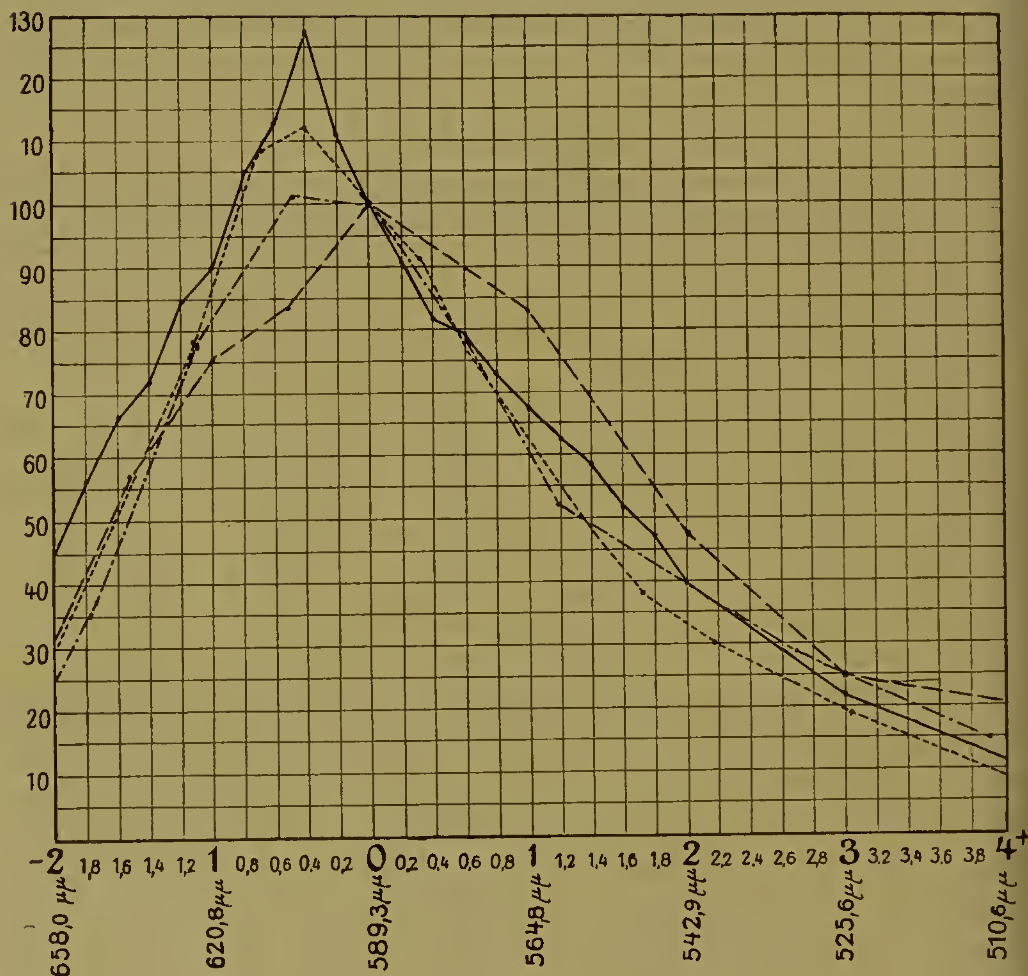


Fig. 2.

———————— Minimalfeld-Helligkeiten; — · — · — · — Peripheriewerte;
-------------------- Rotwerte des Deuteranopen; — — — — — Flimmerwerte.

Ob die Abweichungen nur auf der Unsicherheit der Beobachtungen beruhen und realiter alle 4 als identisch zu betrachten sind, oder ob den Unterschieden des Verlaufs doch eine reale Bedeutung zukommt, möchte ich übrigens ausdrücklich dahingestellt lassen.

Eine weitere Verfolgung der gestellten Aufgabe habe ich zunächst in der Richtung versucht, dafs ich prüfte, ob die gewählten

Bedingungen ausreichten, um die Bestimmungen von den bei den Peripheriewerten so störenden Einmischungen der Adaptation unabhängig zu machen. Dabei mufs ich betonen, dafs es mir nicht darum zu tun war, festzustellen, ob meine Werte vom Adaptationszustand absolut unabhängig wären, was von vornherein bei einer Exzentrizität von 1°,5 nicht für wahrscheinlich gelten konnte, sondern nur, ob die mäfsigen Zustandsänderungen, die bei solchen Versuchen unvermeidlich sind, schon einen bemerkbaren Einflufs auf die Ergebnisse besitzen oder ob die Werte, wie man sie unter praktisch gut realisierbaren Bedingungen erhält, als feste und zwar einer maximalen Helladaptation entsprechende genommen werden dürfen. Dieses wird man, wie mir scheint, anzunehmen berechtigt sein, wenn sich herausstellt, dafs selbst eine vollständige Verdunkelung der Augen während einiger Minuten die Resultate noch nicht bemerkbar modifiziert.

Dieser Erwägung folgend habe ich eine Anzahl von Versuchen so angestellt, dafs die oben geschilderten Einstellungen für ein und dasselbe spektrale Licht in zahlreicher Wiederholung ausgeführt wurden und zwar 3 Einstellungen bei voller Helladaption, dann 3 nach einer 5 Minuten dauernden Verdunkelung der Augen, dann wieder 3 nach voller Helladaptation usw. Die Versuche ergaben, dafs die Unterschiede durchaus in den Fehlergrenzen blieben; durchschnittlich lagen für dasselbe Licht bald die bei Helladaptation, bald die bei der erwähnten beginnenden Dunkeladaptation erhaltenen Werte höher. Man wird hiernach berechtigt sein, anzunehmen, dafs, wenn man im hellen Zimmer beobachtet und im übrigen keine besonderen Vorsichtsmafsregeln trifft, in der Tat feste Werte erhalten werden, die man als einer maximalen Helladaptation entsprechend und durch die Einmischung der Dämmerungsorgane nicht nennenswert beeinflufst ansehen darf.

Ein weiterer Punkt, den ich zum Gegenstand der Untersuchung machte, war sodann der, ob sich die Helligkeitsverhältnisse durch F a r b e n u m s t i m m u n g modifizieren lassen. Ein Eingehen auf die dieser Frage zukommende theoretische Bedeutung darf an dieser Stelle unterbleiben. Da die Entstehung der farblosen Helligkeitsempfindung zur Zeit jedenfalls noch nicht endgültig aufgeklärt ist, so wird jede Vermehrung unseres rein empirischen Wissens in dieser Beziehung von Nutzen und eine Vervollständigung desselben vielleicht am besten zunächst ganz ohne bestimmten theoretischen Gesichtspunkt anzustreben sein.

Zum Zwecke solcher Beobachtungen stellte ich seitlich neben der oben beschriebenen Versuchseinrichtung ein farbiges Feld auf (ein farbiges Papierstück, meist von gegenfarbigem Grunde umgeben, oder auch eine mit farbigem Glase bedeckte, von einem Auerbrenner erleuchtete Mattglasscheibe).

Ein passender Punkt des so erhaltenen farbigen Feldes wurde nun einige Zeit (meist 30 Sek.) fixiert und unmittelbar danach die Helligkeitsbestimmungen ausgeführt, wobei nun der die kleine Öffnung umgebende Grund samt dieser selbst lebhaft komplementär zu der vorher betrachteten (umstimmenden) Farbe erschien. Versuche dieser Art habe ich mit rotem und blauem Licht als umstimmendem ausgeführt. Das Gesamtergebnis derselben kann ich dahin zusammenfassen, dafs sich in den meisten Fällen Änderungen der Helligkeitsverhältnisse, die die Grenze der Beobachtungsfehler überstiegen, nicht konstatieren liefsen. In einigen Fällen schienen sich zwar Modifikationen zu ergeben; doch waren auch diese so geringfügig und regellos, dafs ich auf sie kein Gewicht legen kann und von ihrer Mitteilung absehen möchte.

Als letzte Gruppe habe ich endlich Beobachtungen anzuführen, durch die ermittelt werden sollte, wie sich die Dinge gestalten, wenn die von den verschiedenen spektralen Lichtern zu erleuchtende kleine Öffnung statt wie bisher von weifsem, von einem f a r b i g e m Grunde umgeben ist. Technisch war dies mit grofser Leichtigkeit auszuführen. Es wurde eine Anzahl starker Kartonblätter mit verschiedenfarbigen Papieren überzogen, in diese wiederum Öffnungen von 0,6 mm Durchmesser eingestochen und diese Scheiben an Stelle der früher benutzten weifsen verwendet. — Es ergab sich sogleich, dafs auch hier stets eine bestimmte Intensität für die Erleuchtung des kleinen Feldes gefunden werden kann, bei der es unsichtbar wird, während es bei höherer oder geringerer als heller oder dunkler Punkt erscheint. — Ähnliches ist schon aus der ganz einfachen Beobachtung kleiner grauer Papierschnitzel auf farbigem Grunde zu entnehmen. Ein solches Schnitzel kann, wenn es gerade die richtige Helligkeit besitzt, auf farbigem Grunde bei hinlänglich kleinem Gesichtswinkel unsichtbar werden, während sowohl hellere als dunklere Schnitzel unter dem gleichen Gesichtswinkel noch gut wahrnehmbar sind. Es ist klar, dafs hier die Verhältnisse in vieler Hinsicht anders sind als bei farbigen Feldern auf farblosem

Grunde. Man kann hier nicht sagen, dafs die Farbenempfindung unter der Schwelle bleibe. Eher würde man sagen dürfen, dafs die auf kleinem Felde bestehende Abweichung von einer auf gröfserer Fläche gegebenen farbigen Empfindung unter der Schwelle bleibt und dafs die in der Umgebung vorhandene Farbenempfindung auf der kleinen farblos oder andersfarbig beleuchteten Fläche in gewisser Weise ergänzt wird. Bemerkenswerterweise findet aber diese Supplierung der Farbe im allgemeinen nur bei der für das Verschwinden günstigsten Intensität, d. h. also bei Gleichheit der Helligkeit statt. Ist diese aber zu grofs oder zu gering, so wird mit dem Unterschied der Helligkeit stets auch zugleich der der Farbe gesehen, d. h. das Schnitzel farblos, eventuell gegenfarbig auf dem farbigen Grunde gesehen. Ähnlich bemerkt man bei den hier in Rede stehenden Versuchen, dafs der kleine von spektralem Licht erleuchtete Punkt bei einer bestimmten Lichtintensität verschwindet; bei gröfserer oder kleinerer Lichtstärke wird in der Regel mit der Helligkeitsdifferenz zugleich auch ein Unterschied der Farbe bemerkbar.

Endlich ist zu beachten, dafs bei diesen Versuchen die Farbenumstimmungen in ähnlicher Weise wie bei den vorher besprochenen, ja vielleicht in noch höherem Mafse ins Spiel kommen. Da eine absolute Fixation nicht stattfindet, so sind z. B. bei rotem Grunde die beobachtenden Netzhautstellen alle fast andauernd von rotem Licht getroffen und also alsbald in gewissem Mafs rot-ermüdet.

Wie man nun aber auch einen Versuch dieser Art sich theoretisch deuten mag und wie man insbesondere die Ergebnisse mit den Begriffen der Schwellenwerte in Verbindung bringen mag, es erschien jedenfalls von Interesse, die analogen Bestimmungen auch unter Einführung dieser Modifikation durchzuführen.

Es zeigte sich nun, dafs die auf farbiger Umgebung bestimmten Minimalfeldhelligkeiten von den auf farblosem Grunde gefundenen erheblich abweichen oder, wie man den Sachverhalt auch ausdrücken kann, dafs die Verhältnisse der Minimalfeldhelligkeiten von der Farbe des Grundes in ausgesprochener Weise abhängig sind.

Man ersieht dies aus der folgenden Tabelle und der Figur 3

Der Vergleich ergibt, dafs auf blauem Grunde die Minimalfeldhelligkeiten sich annähernd ähnlich wie auf farblosem

Tabelle IV.

Spektraler Ort und Wellenlänge des homogenen Lichtes		Farbiger Fleck auf rotem Grunde	gelbem	blauem	weifsem
— 2	658,0 μμ	35,6	41,5	41,7	44,9
— 1	620,8 „	82,6	91,2	97,9	91,5
— 0,5	604,5 „		97,7	117,6	120,4
0	589,3 „	100	100	100	100
+ 1	564,8 „	106,9	85,8	70,8	68,6
+ 2	542,9 „	58,3	61,3	44	39,1
+ 3	525,6 „	41	41,9	19,7	21,6

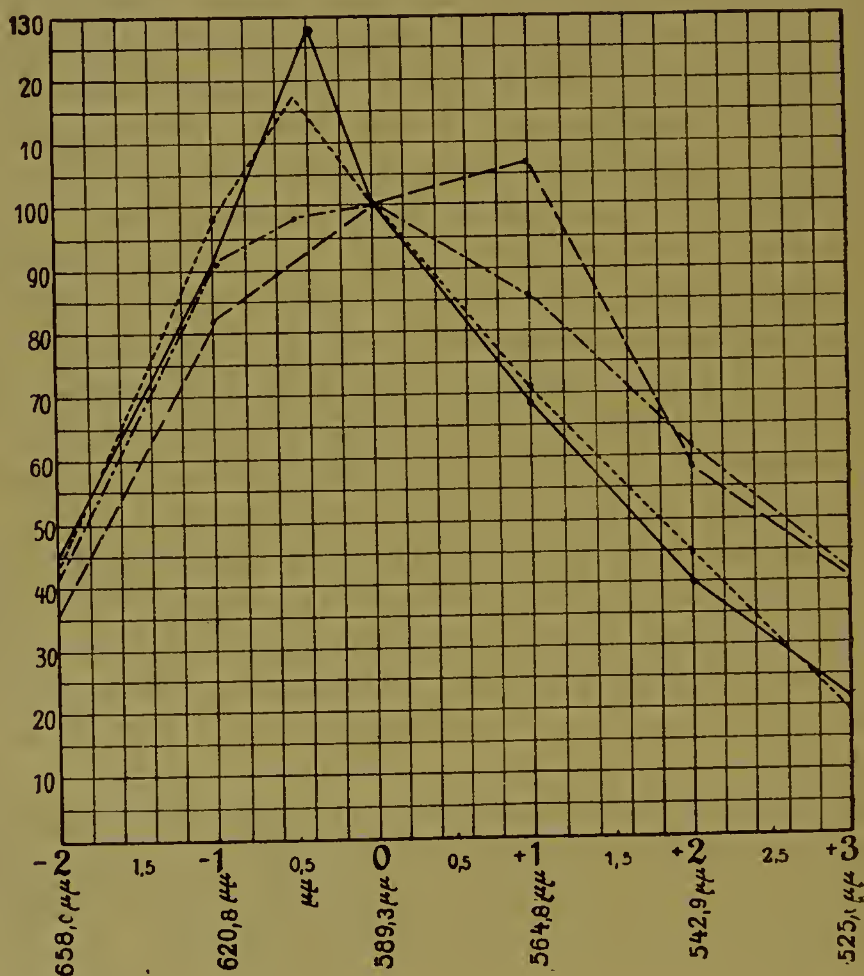


Fig. 3.

Minimalfeld-Helligkeiten bei Beobachtung des farbigen Fleckes auf weifsem Grunde (————————), auf rotem (— — — — —), auf gelbem (— · — · — · —) und auf blauem (-----------------) Grunde.

darstellen, dafs dagegen bei roter und gelber Färbung der Umgebung die kurzwelligen Lichter an Helligkeit zu gewinnen scheinen. Das Maximum ist auf gelber Umgebung bis 589, auf roter sogar bis 565 $\mu\mu$ verschoben.

Von einer Erörterung dieses Befundes unter theoretischen Gesichtspunkten möchte ich hier absehen; nur darauf sei hingewiesen, dafs eine Heranziehung bekannter und verbreiteter Annahmen über den Zusammenhang benachbarter Netzhautstellen uns hier zu keiner Erklärung führt. Nach den Anschauungen Herings hätten wir uns allerdings zu denken, dafs die rote Belichtung der Umgebung auf dem kleinen Felde ähnlich einem Grünreize wirke; und nehmen wir die Anschauungen Herings über die spezifische Helligkeit der Farben hinzu, so würde sich hieraus eine Verdunkelung, ähnlich auf grünem oder blauem Grunde eine Aufhellung des spektral erleuchteten Flecks ergeben. Nicht ersichtlich aber wäre, warum diese auf der Wechselwirkung der Farben beruhende Aufhellung oder Verdunkelung nicht allen Lichtern des Flecks in gleichem Mafse zugute kommt. Gerade darin aber besteht die uns hier interessierende Tatsache, dafs dies bei den verschiedenen Lichtern in ungleichem Betrage der Fall ist und hierdurch die Helligkeitsverteilung im Spektrum sich als eine geänderte darstellt. Hierfür irgend welche Erklärungen zu ersinnen würde allerdings nicht zu schwierig sein; doch glaube ich, dafs dies nicht geschehen kann ohne sich in wenig rätlicher Weise auf hypothetisches Gebiet zu begeben.

(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Über den Einflufs des Helligkeitskontrastes auf Farbenschwellen.

Von

Roswell P. Angier.

Assistent an dem physiologischen Institut zu Berlin.

Bei Untersuchungen über simultanen Helligkeits- oder Farbenkontrast sind vier grundlegende Anordnungen oder Versuchsbedingungen möglich. Erstens und zweitens ein ungefärbtes oder ein farbiges Feld auf einem farbigen Hintergrund (Farbenkontrast), drittens ein farbloses Feld auf einem farblosen Hintergrund (einfacher Helligkeitskontrast) und viertens ein farbiges Feld auf einem farblosen Hintergrund, die notwendige Bedingung zur Feststellung etwaiger Beziehungen zwischen Helligkeitskontrast und der Wahrnehmung von Farben. Von diesen vier Anordnungen sind die ersten drei wiederholt Gegenstand genauer Untersuchungen gewesen; mit der vierten dagegen sind meines Wissens niemals erschöpfende Versuche angestellt worden.

Da alle herrschenden Kontrasttheorien auf den wohlbekannten Gesetzen entweder der Helligkeits- oder der Farbenkontraste aufgebaut sind und jedes dieser Gebiete getrennt behandeln, lassen sie uns keineswegs vermuten, selbst wenn sie zur Erklärung der Erscheinungen ausreichten, dafs irgend ein Einflufs der Helligkeitskontraste auf die Wahrnehmung von Farben bestehe. Die Untersuchung dieses Einflusses hat daher nicht nur ein bedeutendes theoretisches Interesse, sondern sie bildet auch, wie ich schon andeutete, den logischen Abschlufs

der Reihe der möglichen prinzipiellen Fragestellungen auf dem Gebiete des Simultankontrastes.

Bei Versuchen über peripherisches Farbensehen hatte allerdings AUBERT[1] schon gefunden, daſs ein Farbenfleck auf hellem Hintergrunde seine charakteristische Färbung früher, d. h. näher an der Fovea verlor, als wenn er sich auf einem dunklen Hintergrund befand. Trotzdem ist diese Tatsache, die doch beweist, daſs zum mindesten unsere peripherische Farbenempfindung durch solche Helligkeitsunterschiede beeinfluſst wird, bisher als ein mehr oder weniger zufälliger Nebenumstand behandelt worden, da sie weder als Erscheinung für sich genauer untersucht worden ist, noch in der Methodik der Untersuchungen über das peripherische Farbensehen genügende Beachtung gefunden hat.

Die Frage, mit der ich mich in dieser Arbeit besonders beschäftigen will, ist bisher nur von v. KRIES[2] in den folgenden Sätzen einer kürzlich von ihm veröffentlichen Abhandlung erwähnt worden.

„Es zeigt sich nämlich, daſs vielfach die für eine Gesichtsfeldstelle zu ermittelnden S c h w e l l e n w e r t e durch starke Belichtung der Umgebung erheblich verschoben werden können. So ist vor allem leicht zu bemerken, daſs kleine farbige Objekte ihre Farbe einbüſsen, wenn man sie vor einem sehr hellen Hintergrund betrachtet, während die Farbe deutlich hervortritt, wenn man den Hintergrund durch einen dunkleren ersetzt. Auch geringe Helligkeits- oder Farbendifferenzen zweier aneinanderstoſsender kleiner Felder kann man durch starke Belichtung der Umgebung unmerklich machen.“

Auf die Anregung des Herrn Geh. v. KRIES unternahm ich es, diese Erscheinung genauer zu untersuchen. Erstens wollte ich die zugrunde liegende Tatsache unter verschiedenen Versuchsbedingungen bestätigen, zweitens aber auch feststellen, ob die Intensität des farbigen Lichtes, die erforderlich ist, um eine Farbe auf den Schwellenwert zu bringen, zu den Werten des Helligkeitskontrastes zwischen dem farbigen Feld und dem farblosen Hintergrund in quantitativ bestimmbarem Verhältnis steht

---

[1] AUBERT: Grundzüge der physiol. Optik. Leipzig, 1876. S. 541—543.

[2] v. KRIES. Nagels Handbuch der Physiologie des Menschen. Bd. III, S. 241. Braunschweig, 1904.

oder nicht. Diese Versuche wurden in dem Wintersemester 1904/05 ausgeführt und ich ergreife mit Vergnügen diese Gelegenheit Herrn Geh. v. Kries für die Anregung zu dieser Arbeit und seine stets bereitwillige Unterstützung meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Die bei diesen Versuchen verwendeten technischen Hilfsmittel hatten die folgenden Bedingungen zu erfüllen. Erstens mufste die Intensität des farbigen Lichts, das eine kleine Fläche in der Mitte eines grofsen farblosen Hintergrundes beleuchtete und dessen Schwellenwert ermittelt werden sollte, innerhalb möglichst weiter Grenzen veränderlich sein. Ferner mufste die objektive Intensität des farbigen Feldes und des Hintergrundes unabhängig voneinander durch Hinzufügen von weifsem Licht von 0 bis zu einer möglichst hohen Grenze gesteigert werden können. Waren diese beiden Erfordernisse gegeben, so konnten die Versuchsbedingungen bei Ermittlung der Schwellenwerte nach drei verschiedenen Richtungen variiert werden und zwar

a) Änderung der Helligkeit des farbigen Feldes allein mit Hilfe von weifsem Licht.

b) Änderung der Helligkeit des Hintergrundes allein.

c) Gleichzeitige Änderung der Helligkeit beider Felder in demselben Sinne, d. h. so, dafs beide Felder durchweg gleiche Helligkeit behielten. Diese Variation will ich in Zukunft als „parallele Änderung“ bezeichnen. Unter den Versuchsbedingungen a) und b) würde zwischen Hintergrund und farbigem Feld ein Helligkeitskontrast bestehen, bei dem Versuch c) dagegen nicht. Diese drei Fälle umfassen alle möglichen Beziehungen zwischen den Intensitäten des farbigen Beobachtungsfeldes und des Hintergrundes.

Die beigefügte Skizze der Versuchsanordnung (Fig. 1) wird, denke ich, genügen, die wesentlichen Einzelheiten anschaulich zu machen. Der Hintergrund oder das äufsere Feld wurde durch einen grofsen Bogen weifse Pappe, *K*, gebildet und das farbige oder innere Feld durch ein rundes Loch (*IF*), ca. 1 cm im Durchmesser, so dafs es sich ganz auf die Fovea abbildete, in der Mitte dieses Bogens.

Der Hintergrund, der um ihn für Licht gänzlich undurchlässig zu machen mit Stanniol hinterklebt war, war in einer Öffnung in der Wand zwischen zwei Zimmern so aufgehängt, dafs aufser durch die Öffnung *IF* kein Licht von dem einen in das andere

Zimmer gelangen konnte. Der Rand der Öffnung *IF* wurde sorgfältig glatt abgeschnitten, um zwischen dem inneren und dem äuſseren Feld eine scharf abgesetzte Grenze herzustellen. Das äuſsere Feld empfing sein Licht von einem Auerbrenner *WA* (äuſseres Weiſs), der in einen mit einer Öffnung versehenen schwarzen Zylinder eingeschlossen war. Um die Intensität des Lichtes nach Belieben verändern zu können, war der Brenner auf Schienen (S^1) von etwa 400 cm Länge verschiebbar angeordnet. Das innere Feld wurde von den beiden Auerbrennern *WI* (inneres Weiſs) und *FL* (farbiges Licht) erhellt. Das von *WI* ausstrahlende Licht fiel zuerst auf eine an dem schmalen Ende des Trichters T^2 aus schwarzer Pappe befindliche Milchglasscheibe

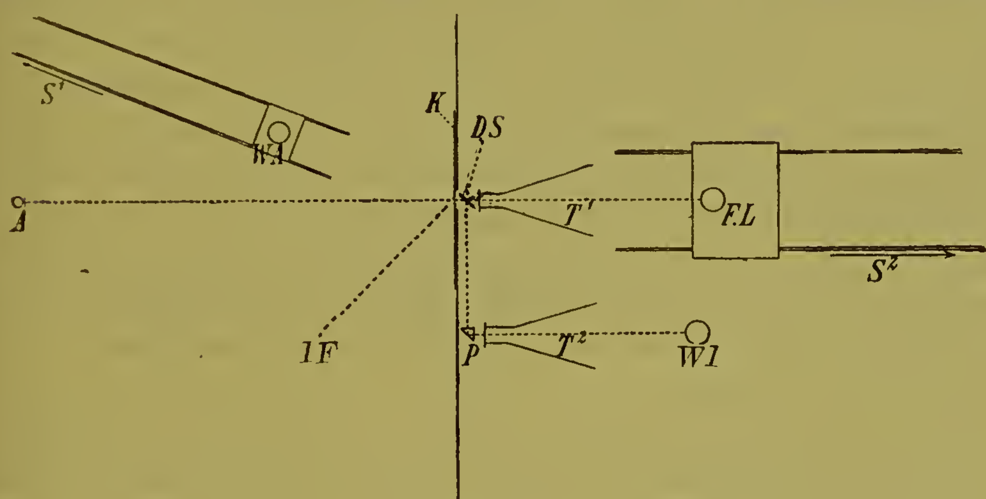


Fig. 1.

und wurde von da aus durch ein total reflektierendes Prisma *P* und einen durchsichtigen Spiegel *DS*, ein mikroskopisches Deckgläschen, auf die Öffnung *IF* geworfen. Das farbige Licht passierte zuerst ebenfalls eine ähnliche Milchglasscheibe, und dann gefärbte Gelatineblättchen, die mit der Milchglasscheibe zusammen an dem schmalen Ende des schwarzen Trichters T^1 angebracht waren. Da die Intensität des farbigen Lichts zur Feststellung des Schwellenwertes in rascher Folge stufenweise veränderlich sein muſste, war die Lichtquelle *FL* auf einem kleinen Wagen angebracht, der auf Schienen (S^2) von 700 cm Länge leicht hin und hergeschoben werden konnte. Die beiden Lichtquellen *WI* und *FL* sollten nun das Feld *IF* jede für sich völlig unabhängig beleuchten, daher wurden sie durch eine geschwärzte Scheidewand getrennt, so daſs kein Licht von dem einen zu dem anderen

Apparat gelangen konnte. Die Wände des Zimmers waren, um Störungen durch reflektiertes Licht auszuschliefsen, ebenfalls geschwärzt.

Mit Hilfe des Schienenweges S^1 konnte die Intensität des äufseren Weifs von 0 (Lampe ausgelöscht) bis 256 stufenweise gesteigert werden. Der willkürlich gewählte Punkt der gröfsten Intensität wurde bei einer Entfernung der Lampe von *IF* von 25 cm erreicht. Die Intensitäten des inneren Weifs und des farbigen Lichts wurden nach der Entfernung der Lichtquellen von den Milchglasscheiben in T^1 und T^2 angegeben. Die Intensität des farbigen Lichts liefs sich von 0 bis 19600 steigern. Wie aus den Tabellen hervorgeht, zogen wir der Einfachheit halber vor, für das innere Weifs keine besondere Intensitätsskala aufzustellen, sondern die Intensitäten in derselben Einheit wie die Werte des äufseren Weifs anzugeben. Die absolute Intensität des äufseren Weifs bei 256 war viel höher als die des farbigen Lichtes bei 19600, hauptsächlich, weil das Licht der Lampe *FL*, ehe es das innere Feld erreichte, durch eine Milchglasscheibe und farbige Gelatineblättchen fiel und dadurch abgeschwächt wurde. Für die vorliegende Untersuchung war dies natürlich gleichgültig, da nur die entsprechenden Werte der beiden Serien untereinander verglichen werden sollten.

Der Beobachter (der Verf.) safs an dem Punkt A der Skizze. Sein Kinn ruhte dabei auf einer Stütze auf und zwar so, dafs seine Blicklinie das 100 cm weit entfernte innere Feld *IF* senkrecht traf. Um die wirksame Lichtmenge einzig und allein von der Intensität des Sehfeldes abhängig zu machen, wurde eine künstliche Pupille von 1,5 mm Durchmesser angewendet.

Die zu den Versuchen angewendeten Farben waren ein sattes Rot, Grün, Gelb und Blau. Für meine Zwecke war es unnötig den absoluten Schwellenwert irgend einer dieser Farben zu bestimmen, sondern es kam vielmehr darauf an, für die jeweilige Sitzung so genau wie möglich festzustellen, wieviel ein gegebener Schwellenwert durch eine gegebene Veränderung des Unterschiedes zwischen den Intensitäten des inneren und des äufseren Feldes, d. h. des Helligkeitskontrastes, erhöht oder erniedrigt würde. Bei Untersuchungen d i e s e r Art werden, wie mir scheint, gewisse Fehlerquellen möglichst vollständig beseitigt, wenn der Beobachter den Unterschied zwischen zwei an der Schwelle stehenden gleichzeitig dargebotenen farbigen Lichter

wahrzunehmen hat, d. h. wenn er anzugeben hat, welche Hälfte des Beobachtungsfeldes (etwa die rechte oder die linke) eine von zwei gleichhellen und möglichst einander unähnlichen Farben einnimmt. Hierzu ist natürlich erforderlich, daſs man schnell und ohne Vorwissen des Beobachters die Stellung der beiden Farben wechseln könne.

Da die Farben gleichzeitig dargeboten wurden, war es ferner unumgänglich notwendig die zusammengehörigen Paare (rot-grün und gelb-blau) auf dieselbe Helligkeit einzustellen. Der Beobachter konnte nämlich sonst die beiden Farben in der Nähe des Schwellenwertes noch an der verschiedenen Helligkeit unterscheiden, selbst wenn die Farbe selbst nicht mehr wahrzunehmen war.

Um diese gleiche Helligkeit zu erzielen, gab ich den beiden Farben eines Paares den gleichen „Peripheriewert" in folgender Weise. In dem äuſseren Feld, das mit farblosem Licht gleichförmig erhellt wurde, erschien das innere Feld, dessen Durchmesser zu diesem Zwecke auf 2 mm verkleinert wurde, und das sein Licht durch eines der farbigen Gelatinefenster erhielt. Dieses Feld betrachtete ich im peripherischen Sehen unter Beibehaltung einer guten Helladaptation für die betreffende Netzhautstelle so, daſs es farblos erschien, und stellte nun durch Vor- und Zurückschieben der Lampe *FL* seine Intensität ein bis sie der des Hintergrundes gleich war, das heiſst, bis das Feld in dem Hintergrund gänzlich verschwand. Dann setzte ich das andere Gelatinefenster des Farbenpaares an Stelle des ersten und fügte, während die Lampen in derselben Lage stehen blieben, so lange farblose Gelatineblätter hinzu, bis die Intensität so weit gemindert war, daſs auch diese Farbe für denselben peripherischen Teil der Netzhaut in dem Hintergrund verschwand. Dadurch wurde erreicht, daſs die beiden leuchtenden Farbenfelder für die Peripherie des helladaptierten Auges und damit gemäſs den von Kriesschen Ausführungen[1] für die farbenempfindlichen Elemente des Auges überhaupt denselben Reizwert oder Weiſsvalenz hatten. Im Laufe der Versuche wiederholte ich diesen Ausgleich der „Peripheriewerte" der beiden Farbenpaare mehrmals mit der gröſsten Sorgfalt.

Nachdem so die zu jedem Farbenpaar gehörigen Gelatineblättchen endgültig ausgewählt worden waren, wurden sie zu-

[1] *Diese Zeitschrift* 15, 247. Auch a. a. O. 199, 201, 202—203.

sammen auf einer dünnen kreisförmigen Milchglasscheibe befestigt. Wenn diese Scheibe nun in ihre Stellung am Ende des Trichters gebracht wurde, so erblickte der Beobachter zwei verschieden gefärbte leuchtende Halbkreise, die durch eine feine senkrechte Grenzlinie voneinander getrennt waren. Ein Assistent konnte ohne Vorwissen des Beobachters die ganze Scheibe rasch umdrehen, so dafs die Farben ihm vertauscht gezeigt wurden, ohne dafs die Pause zwischen den Beobachtungen deshalb verlängert zu werden brauchte. Um schliefslich, auch wenn die Intensität der Farben sich unter dem Schwellenwert befand, dem Beobachter eine das Feld genau halbierende Trennungslinie darzubieten, wurde ein schwarzer Faden in passender Weise zwischen dem Beobachter und dem inneren Feld einige Zentimeter von diesem entfernt aufgehängt. Dieser Faden legte natürlich auch die Stellung des beobachtenden Auges fest, da bei jeder seitlichen Bewegung des Auges das Feld sofort ungleich geteilt erscheinen mufste.

Bei den meisten Versuchsreihen, d. h. den Versuchen, die in einer Sitzung durchgeführt wurden, wurde nun in gleicher Weise und zwar folgendermafsen verfahren: Dem äufseren Weifs wurde eine beliebige Intensität gegeben und die des inneren Weifs so eingestellt, das beide Felder gleich hell erschienen. Dann wurde bei konstanter Intensität des inneren Weifs der Schwellenwert der Versuchsfarben für eine Reihe von Intensitäten des äufseren Weifs festgestellt. Zur Bestimmung jedes Schwellenwertes bewegte der Assistent die Lampe *FL* sprungweise von dem entfernten Ende des Schienenweges heran und ich gab jedesmal, wenn mir ein Sprung angekündigt wurde, ein Urteil ab bis der Punkt erreicht war, an dem ich fünfmal hintereinander richtig angeben konnte, auf welcher Seite des halbierten inneren Feldes sich die rote Farbe des rotgrünen Paares oder die gelbe des gelb-blauen befand. Ich blieb in Unkenntnis über die Richtigkeit meiner Angaben, bis der Schwellenwert erreicht und festgestellt war.

Da die Beobachtungen anstrengend und zeitraubend waren, machte ich meine Bestimmungen, wie die Tabellen zeigen, meistens an dem rot-grünen Paar allein und benutzte das gelb-blaue nur zur Ergänzung und Kontrolle, auch wurden die Beobachtungen in einer Sitzung stets nur an einem Farbenpaar gemacht.

Einige Versuchsreihen wurden ausgeführt, bei denen nur eine Farbe angewendet wurde, die dann natürlich das ganze innere Feld einnahm. Durch Drehung der die farbigen Gelatinen tragenden Milchglasscheibe konnte nach Belieben die eine oder die andere Farbe eines Paares dargeboten werden, so daſs die Versuchsperson niemals zuvor wissen konnte, welche Farbe das Feld füllte. Diese Versuche wurden hauptsächlich zu dem Zwecke gemacht, Fehler aufzudecken, die dadurch hätten entstehen können, daſs trotz meiner Vorsichtsmaſsregeln die beiden farbigen Felder verschieden hell gewesen wären; denn die Farben wurden sukzessiv dargeboten bei fortwährender Änderung in der Lichtstärke des die Farben erzeugenden Lichtes.

Die Werte einer jeden der oben beschriebenen Versuchsreihen unter sich lieſsen demnach erkennen, welchen Einfluſs die Änderung der Intensität des äuſseren Weiſs bei gleichbleibender Intensität des inneren Weiſs auf die Schwellenwerte von Farben ausübt. Da nun ferner die absolute Anfangsintensität des inneren Weiſs von einer Versuchsreihe zur anderen wechselte, während das Verfahren im übrigen das gleiche blieb, konnte durch eine Vergleichung der Versuchsreihen untereinander auch der Einfluſs der Änderung der Intensität des inneren Weiſs auf die Schwellenwerte für einen gegebenen Wert des äuſseren Weiſs nachgewiesen werden. Schlieſslich wurden in anderen Versuchsreihen die Intensitäten sowohl des inneren als auch des äuſseren Feldes parallel verändert, so daſs also nur die absolute Intensität beider sich änderte. Die Variabele war im ersten Fall die Intensität des äuſseren Weiſs, im zweiten die des inneren, im dritten die Intensität beider zusammen. Die Versuche der ersten und zweiten Art sollten die Wirkung einer durch Helligkeits**kontrast** hervorgebrachten Steigerung oder Verminderung des Helligkeitswertes des inneren Feldes auf die Schwellenwerte zeigen, die Versuche der dritten Art dagegen den Einfluſs der Veränderung der Intensität ohne die Einwirkung eines Helligkeitsunterschiedes.

An dieser Stelle muſs ich noch in Kürze einiges über die zur Beseitigung von Fehlerquellen getroffenen Vorkehrungen einschalten. Der Assistent hatte mit besonderer Sorgfalt darauf zu achten, daſs der die Lampe tragende Wagen *W* so geräuschlos bewegt und die Stellung der Farben auch unterhalb des Schwellenwertes so oft und in so unregelmäſsigen Abständen gewechselt wurde, daſs mir als Beobachter die Verschiebung der

Lampe und das Wechseln der Stellung der Farben vollständig verborgen blieb, bis ich durch die Farbenempfindung selbst davon Kenntnis erhielt. Der Assistent verzeichnete jedesmal die Stellung der Lampe und der Farben mit meiner Antwort auf seinen Ruf „Fertig“ in dem Versuchsprotokoll.

Zwischen den einzelnen Beobachtungen richtete ich meinen Blick abwärts von dem äufseren Feld weg, um die Umstimmung des Sehorgans durch weifses Licht, die nach v. Kries[1] schon an sich den Schwellenwert erhöht, zu vermeiden. Auf den Ruf „Fertig“ fixierte ich auf einen Augenblick die Mitte der Trennungslinie der beiden Farben, sah dann, wenn ich die Farbe nicht unterscheiden konnte, wieder weg, wiederholte dieses Verfahren vier- oder fünfmal, und antwortete schliefslich „ich weifs nicht“ oder „rot links“ oder „rechts“. Indem ich so mein Urteil stets von dem ersten Augenblick des Fixierens abhängig machte, vermied ich, soweit dies bei Versuchen, bei denen überhaupt fixiert werden mufs, möglich ist, die Fehler, die durch die Ermüdung des Sehorgans und die flüchtigen Umstimmungen desselben (sog. sukzessiven Kontrast) infolge von unwillkürlichen Augenbewegungen entstehen. Um die durch allzulange fortgesetzte Beobachtungen entstehende Ermüdung möglichst zu verringern, ruhte ich nach jeder Bestimmung eines Schwellenwertes einige Zeit aus.

Bei der Erkennung einer Farbe, etwa der roten, beschränkte ich mich, wie ich schon andeutete, darauf, zu bestimmen, welche Hälfte des inneren Feldes sie einnahm. Ich wartete nicht etwa bis der empfangene Eindruck einer bewufst vorgestellten normalen „Rot“ entsprach, sondern ich begnügte mich damit festzustellen, dafs es rot war, ob es nun rot aussah oder nicht. Einige wenige Versuche, die ich machte, so lange zu warten, bis die Farbe wirklich „rot“ aussah, ergaben so viele subjektive Zweifel und so grofse objektive Schwankungen der Schwellenwerte, dafs das Verfahren sich als undurchführbar erwies. Schon die durch die verschieden starken Helligkeitskontraste hervorgerufenen verschiedenen Sättigungsgrade der Farben hätten seine Anwendung unmöglich gemacht. Auch bei den Beobachtungen an dem ungeteilten (einfarbigen) Feld machte ich meine Angaben in derselben Weise.

[1] Nagels Handbuch. Bd. III, S. 213, 219.

Die gewonnenen Resultate sind in den Tabellen I—IV verzeichnet. Die erste Kolumne jeder Tabelle enthält die Intensitätswerte des äuſseren Weiſs oder der Hintergrundsbeleuchtung (*Wa*); in den folgenden Kolumnen sind die Intensitäten des farbigen Lichtes (*Lf*) angegeben, welche notwendig waren um eine Farbe, bei gegebenen äuſseren und inneren Weiſsintensitäten auf die Schwelle zu bringen. Schlieſslich findet man oberhalb jeder Tabelle den Intensitätswert für das innere Weiſs (*Wi*), daſs, wie erinnerlich sein wird, für eine ganze Versuchsreihe immer konstant blieb, und dessen Wert einem der Werte des äuſseren Weiſs gleichgesetzt und mit derselben Zahl ausgedrückt wurde. Um dies noch anschaulicher zu machen, habe ich diejenige horizontale Reihe der Farbenintensitäten, welche die Schwellenwerte bei gleicher Intensität des äuſseren und des inneren Weiſs angeben, durch Sterne bezeichnet. Wo ich die Ergebnisse mehrerer Reihen zu einem Gesamtmittel vereinigt habe, bedeuten die in gewöhnlichem Druck angegebenen Zahlen diese Gesamtergebnisse, während jedesmal die Resultate der einzelnen Versuchsreihen in Kursivschrift darunter angegeben sind. Überall bedeuten die in Klammern gesetzten Zahlen die Anzahl der einzelnen Beobachtungen.

Tabelle I.

Rot-Grün Paar. Geteiltes Feld. Kontrastwirkung.

Wi = 4,0.

Wa	*Lf*	
0,0	—	—
1,0	—	—
1,8	—	—
4,0*	1,6 (7)* *1,6 (6)* *1,4 (1)*	1,3 (7)* *1,3 (4)* *1,2 (3)*
16,0	2,1 (8) *2,4 (6)* *1,5 (2)*	2,0 (10) *2,0 (6)* *2,0 (4)*
64,0	10,7 (10) *12,9 (6)* *7,2 (4)*	—
256,0	26,1 (6)	22,7 (9)

Tabelle II.

Rot-Grün Paar. Geteiltes Feld. Kontrastwirkung.
Wi = 16,0.

0,0	—	—	—	—	4,9 (9) *4,9 (5)* *4,9 (4)*
1,0	3,9 (2)	—	5,7 (3)	4,9 (9) *5,8 (5)* *3,8 (5)*	3,8 (5)
1,8	6,4 (7) *6,6 (5)* *5,8 (2)*	—	—	—	—
4,0	4,8 (5)	—	8,4 (3)	2,9 (9) *2,8 (5)* *3,0 (4)*	3,4 (5)
16,0*	5,3 (2)*	4,4 (6)*	2,6 (7)*	3,1 (5)*	3,7 (5)*
64,0	5,5 (3)	8,3 (7)	3,0 (6)	6,1 (5)	—
256,0	21,7 (3)	—	12,7 (7)	22,3 (5)	—

Tabelle III.

Blau-Gelb Paar. Geteiltes Feld. Kontrastwirkung.
Wi = 16,0.

0,0	—	—	—	—
1,0	—	8,7 (4)	—	7,6 (4)
4,0	—	9,7 (4)	—	8,4 (4)
16,0*	6,4 (3)*	8,9 (7)* *11,7 (4)* *5,2 (3)*	12,1 (5)* *11,6 (3)* *12,9 (2)*	8,0 (6)* *6,5 (3)* *9,4 (3)*
64,0	10,9 (4)	—	25,3 (4)	—
256,0	28,9 (7) *25,8 (4)* *33,0 (3)*	—	52,1 (4)	—
Fenster auf	35,1 (4)	—	60,5 (4)	—

Tabelle IV.

Rot-Grün Paar. Ungeteiltes Feld. Kontrastwirkung.
Wi = 16,0.

0,0	2,0 (3)	2,4 (5)	2,2 (4)
1,0	2,7 (6)	2,2 (5)	2,5 (4)
4,0	1,8 (5)	2,5 (5)	2,1 (4)
16,0*	2,2 (7)*	1,9 (5)*	2,0 (9)* *2,5 (2)* *1,8 (7)*
64,0	8,4 (4)	6,6 (5)	7,2 (4)
256,0	14,5 (8) *15,9 (5)* *12,2 (3)*	15,7 (8) *16,8 (5)* *13,9 (3)*	15,3 (7) *13.5 (4)* *17,8 (3)*
Fenster auf	19,6 (3)	25,8 (4)	19,9 (4)

Die Tabellen I—IV enthalten die Ergebnisse der Versuche über den Einflufs einer Intensitätsänderung des äufseren Weifs bei konstanter Intensität des inneren Weifs. Aus diesen Tabellen lassen sich folgende Tatsachen ableiten. In jeder Kolumne sind die Schwellenwerte, die unterhalb der bei gleicher Intensität des inneren und äufseren Weifs erhaltenen Werte aufgeführt sind, ausnahmslos höher als diese (mit einem Stern bezeichneten Zahlen) selbst. Daraus geht hervor, dafs jede Steigerung der Intensität des kontrasterregenden Feldes (äufseres Weifs) über die des kontrastleidenden Feldes (inneres Weifs) auch eine Erhöhung des Schwellenwertes zur Folge hat. Die über den gesternten Werten stehenden Zahlen sind dagegen teils höher, teils niedriger als die gesternten Werte, auch sind die Differenzen zwischen diesen Zahlen bei weitem nicht so grofs als bei den unter dem Stern aufgeführten. Eine Verminderung der Intensität des äufseren Weifs unter die des inneren Weifs scheint demnach auf die Schwellenwerte keinen dem Grade oder der Richtung nach bestimmt ausdrückbaren Einflufs auszuüben. Ich habe in der Tat wiederholt gefunden, dafs eine geringe gerade bemerkbare Steigerung der Helligkeit des äufseren Weifs über die des inneren Feldes, eine Farbe, die auf dem Schwellenwert sich befand (wenn die Intensitäten gleich waren), zum Verschwinden brachte, während ich mich nicht überzeugen konnte, dafs eine beträchtliche Erniedrigung der äufseren Intensität, selbst bis auf 0 hinunter, den Schwellenwert irgendwie beeinflufste. Subjektiv sichere Beobachtung war in diesem Fall besonders schwierig, da die gröfsere Helligkeit des inneren Feldes im Vergleich zum äufseren die Farbe sehr ungesättigt erscheinen liefs, so dafs meiner Ansicht nach die geringen und sich widersprechenden Abweichungen in den erhaltenen Werten innerhalb der unvermeidlichen Fehlergrenzen liegen, die ja bei allen Schwellenwertsermittelungen sehr weit gezogen werden müssen. Ich kann daher nicht behaupten, dafs für mich und unter den von mir beobachteten Versuchsbedingungen, wenn das kontrasterregende Feld dunkler ist als das kontrastleidende, irgend eine konstante Änderung des Schwellenwertes sich feststellen läfst.

Eine Vergleichung der Tabellen I und II miteinander zeigt uns den Einflufs der Änderung der Intensität des inneren Feldes

auf die Schwellenwerte. Die Tabellen III und IV können zu dieser Vergleichung nicht mit herangezogen werden, da die in ihnen aufgeführten Ergebnisse unter ganz verschiedenen Bedingungen erhalten worden sind. Man sollte erwarten, daſs unter sonst gleichen Bedingungen eine Erhöhung der Helligkeit eines farbigen Feldes durch Hinzufügen von weiſsem Licht, wie in vorliegendem Fall, eine entsprechende Erhöhung des Schwellenwertes der Farbe verursachen würde, denn eine solche Erhöhung bedeutet für eine gegebene Menge farbigen Lichts eine Abnahme des Sättigungsgrades der Farbe. Aber die „anderen Bedingungen" bleiben sich nicht gleich, denn jede Änderung der Helligkeit des farbigen Feldes ändert zugleich auch das Intensitätsverhältnis d. h. den Kontrast zwischen dem farbigen Feld und dem Hintergrund. Werden aber die Intensitäten von Feld und Hintergrund gleichmäſsig geändert (der Fall der in den Tabellen V und VI behandelt wird), so wird wenigstens auch das Niveau der Helligkeit, auf dem beide stehen, mit geändert.

Der Einfluſs des Hintergrundes auf die Schwellenwerte scheint nun aber nach unserer Erfahrung viel geringer zu sein, wenn der Hintergrund dunkler als wenn er heller ist als das farbige Feld. Wenn wir also zwei Versuchsreihen finden können, in denen die Intensität des äuſseren Feldes konstant bleibt, während in der einen Reihe die Helligkeit des inneren Feldes gesteigert wird, so daſs sie gröſser ist als die des äuſseren Feldes in beiden Reihen, so werden wir durch eine Vergleichung der Werte erkennen können, wie eine Steigerung der Intensität des inneren Feldes allein, wenn der störende Einfluſs des äuſseren Feldes nach Möglichkeit beschränkt ist, auf die Schwellenwerte wirkt. Zwei Reihen dieser Art sind die horizontale Reihe in Tabelle II, die unmittelbar über der mit Sternen bezeichneten steht, und die gesternte Reihe in Tabelle I. In beiden ist die Intensität des äuſseren Weiſs 4, während die des inneren Weiſs von 4 in Tabelle I auf 16 in Tabelle II ansteigt. Der Schwellenwert beträgt, wenn beide Felder die Intensität 4 haben 1,45, wenn dagegen das äuſsere Feld 4 und das innere Feld 16 hat, 4,87, — eine erhebliche Steigerung. In beiden Fällen habe ich die Mittelwerte angenommen. Die übrigen Zahlenreihen der Tabellen I und II können deshalb nicht in dieser Weise miteinander verglichen werden, weil in ihnen die Intensität des äuſseren Weiſs gröſser ist als die des inneren Feldes, und daher zwei Einflüsse

vorhanden sind, die den Schwellenwert in die Höhe treiben, der Helligkeitsunterschied und die Erhöhung der Intensität des inneren Feldes selbst. Der Anteil jedes dieser beiden Einflüsse an der Erhöhung des Schwellenwertes läſst sich natürlich nicht gesondert bestimmen.

Ich möchte auch nicht etwa zu groſses Gewicht auf die anführten Werte legen, da die Beobachtungen wenig zahlreich und die Ergebnisse etwas schwankend sind. In Verbindung mit den Ergebnissen der anderen noch zu betrachtenden Tabellen, wobei irgend eine Kontrastwirkung überhaupt fehlte, zeigen aber diese Zahlen meiner Ansicht nach doch, daſs eine Steigerung der Helligkeit eines farbigen Feldes durch weiſses Licht den Schwellenwert der Farbe merklich erhöht.

Von besonderer Bedeutung sind diese Ermittelungen über den Einfluſs der Weiſs-Intensität des inneren Feldes auf die Schwellenwerte als Warnung für Experimentatoren, die geneigt sind zu vergessen, daſs jede Intensitätsänderung an einem farbigen Feld auch eine Änderung seines Helligkeitsverhältnisses zu dem Hintergrund mit sich bringt und dadurch allen experimentellen Fehlern, die durch schwankende Helligkeitskontraste entstehen können, Tür und Tor öffnet. Wie ich schon im Eingang erwähnte sind in vielen Arbeiten über peripherisches Farbensehen zum Beispiel die Helligkeitskontraste zwischen Farbe und Hintergrund als Nebensache behandelt worden, während doch gerade für die Wahrnehmung mit der Peripherie der Netzhaut bei der die „hell“ und „dunkel“ Adaptierung des Auges die Bedingungen des Versuches kompliziert, eine Vernachlässigung gerade dieser Verhältnisse verhängnisvoll werden kann. In den meisten Fällen ist, wie ich schon ausführte, die Wahrscheinlichkeit eines Irrtumes dann am geringsten, wenn der Hintergrund weniger hell ist als das farbige Feld.

In den Tabellen V und VI sind die Ergebnisse einer parallelen Änderung der Helligkeit des inneren und des äuſseren Weiſs enthalten. Die in den senkrechten Kolumnen aufgeführten Werte zeigen deutlich, daſs eine Zunahme der Intensität des inneren Weiſs, wenn dem äuſseren Weiſs gleichzeitig derselbe Intensitätswert gegeben wird, stets eine recht erhebliche Erhöhung der Schwellenwerte der Farben zur Folge

hat. Ebenso bewirkt eine Abnahme beider Intensitäten ein Sinken der Schwellenwerte.

Tabelle V.

Rot-Grün Paar. Geteiltes Feld. Parallele Änderung.

Wa und *Wi*	Farbiges Licht (*Lf*)		
0,0	—	—	—
1,0	21,2(5)	21,7(5)	27,3(5)
4,0	42,0(5)	39,8(5)	31,8(5)
16,0	40,5(5)	45,3(5)	65,8(8) *74,8 (5)* *54,0 (3)*
256,0	253,2(5)	306,2(5)	253,2(5)

Tabelle VI.

Rot-Grün Paar. Ungeteiltes Feld. Parallele Änderung.

0,0	—	—	—
1,0	4,5(4)	5,4(5)	5,1(4)
4,0	12,3(4)	16,0(10) *19,9 (4)* *13,9 (6)*	14,5(5)
16,0	36,5(5)	28,2(4)	34,6(5)

Im Vergleich zu den Ergebnissen der Tabellen I—IV also, die den Einfluſs einer Änderung der Helligkeit des inneren Feldes durch einen Helligkeits**kontrast** zeigen, ergeben die Tabellen V und VI gerade das entgegengesetzte. Obgleich nämlich die Verdunkelung des inneren Feldes, sei sie nun durch Steigerung der Helligkeit des äuſseren Feldes oder durch gleichmäſsige Verdunkelung beider Felder hervorgebracht, für das Auge genau denselben Eindruck macht, steigen in dem ersten Fall die Schwellenwerte, während sie in dem zweiten fallen. Das Wesentliche ist also nicht die subjektive Verdunkelung des inneren Feldes, die in beiden Fällen eine Erhöhung des Sättigungsgrades der Farben mit sich bringt, sondern die objektive Zunahme der Intensität des weiſsen Lichtes. Eine Zunahme der Intensität des weiſsen Lichtes, sei es im inneren Feld, sei es im äuſseren oder in beiden zugleich, verursacht jedesmal ein Steigen der Schwellenwerte.

Die qualitative Feststellung dieser Tatsache ist das Hauptergebnis meiner Versuche.

Was nun die quantitative Bestimmung dieser Wirkung des weiſsen Lichtes betrifft, so zeigen allerdings die Tabellen I—IV, daſs eine fortgesetzte Steigerung der Intensität des farblosen Hintergrundes eines farbigen Feldes, das selbst konstant gehalten wird, auch ein fortlaufendes Steigen des Schwellenwertes der Farben zur Folge hat und auch daſs Steigerung der Intensität des farbigen Feldes selbst durch weiſses Licht die Schwellenwerte entsprechend erhöht, gleichgültig ob dabei der Hintergrund konstant bleibt oder gleichzeitig heller wird. Nichtsdestoweniger habe ich weder in dem einen noch in dem anderen Fall eine einfache durch Zahlen ausdrückbare Beziehung zwischen den Erhöhungen der Schwellenwerte und den entsprechenden Steigerungen der Lichtintensität herausfinden können.

Die theoretische Deutung meiner Versuchsergebnisse bleibt, wie sich von selbst versteht, mit der Schwierigkeit behaftet, daſs die wechselnden Erleuchtungen, sei es des inneren, sei es des äuſseren Feldes auch zu Umstimmungen Veranlassung geben, somit die beobachteten Änderungen der Schwellenwerte ganz oder teilweise auf diesen beruhen können. Es ist dies wie man sieht eine Schwierigkeit, die bei quantitativen Ermittlungen wegen der für die Bestimmung einer Schwelle unter allen Umständen erforderlichen Zeit nicht beseitigt werden kann. Dagegen erschien es von Interesse, wenigstens qualitativ das Bestehen der gefundenen Abhängigkeiten auch unter Bedingungen zu prüfen, bei denen durch eine möglichst plötzliche Variierung der betr. Lichtverhältnisse die Bedeutung jenes Momentes so sehr als eben möglich eingeschränkt wurde. Diesem Zwecke dienten eine Anzahl hier noch anzuführender Kontrollversuche. Um möglichst schnelle Änderungen des äuſseren Weiſs zu erhalten, stellte ich beide Felder auf dieselbe Helligkeit ein, indem ich den Gasschlauch der Lampe, die das äuſsere Feld beleuchtete, mit einem Quetschhahn zusammendrückte. Dann fixierte ich gleich von Anfang an das innere Feld und veränderte augenblicklich durch Öffnen oder Schlieſsen des Quetschhahnes die Intensität des äuſseren Feldes. Jede Zunahme der Intensität der Beleuchtung, selbst eine nur eben wahrnehmbare, erhöhte auch den Schwellenwert. Gewöhnlich verfuhr ich hierbei so, daſs ich die Farbe bei gleicher Helligkeit beider Felder nahezu auf den Schwellenwert

brachte und dann feststellte, dafs eine Erhöhung der Intensität des äufseren Feldes sie zum Verschwinden brachte. Wenn sich die Farbe zu Anfang über dem Schwellenwert befand, bewirkte jede Erhöhung der Intensität des Hintergrundes, dafs sie sich mehr und mehr dem Schwellenwerte näherte, bis sie schliefslich bei einem gewissen Wert der äufseren Intensität ganz verschwand. Diese Tatsache bestätigt das in den Tabellen enthaltene Ergebnis, dafs nämlich die Höhe der Schwellenwerte zu der Intensität des äufseren Feldes in gewisser quantitativer Beziehung steht, wenn sich auch kein bestimmt formulierbares Gesetz ableiten läfst. Eine Erniedrigung der äufseren Intensität unter die des inneren Feldes hat, wie ich bereits erwähnte, keinen sicher feststellbaren Einflufs auf die Schwellenwerte weder in der einen noch in der anderen Richtung.

Um ferner auch den Einflufs paralleler Änderung der Helligkeit beider Felder auf die Schwellenwerte in analoger Weise (tunlichst ohne Umstimmung des Sehorgans durch weifses Licht) zu zeigen, wurde die Versuchseinrichtung folgendermafsen abgeändert. Der Karton, der als äufseres Feld gedient hatte, wurde durch eine Fläche aus schwarzem Sammt ersetzt, die in gleicher Weise wie der Karton in der Mitte mit einem Loch als inneres Feld versehen war. Vor diesem Loch wurde an der Stelle, die sonst das Auge des Beobachters eingenommen hatte, ein durchsichtiger Spiegel so aufgestellt, dafs er mit der schwarzen Sammetfläche einen Winkel von 45° bildete. Dadurch wurden die aus dem Loch austretenden Strahlen des farbigen Lichtes parallel zu der Sammtfläche reflektiert. Wenn ich nun durch den durchsichtigen Spiegel auf einen Schirm aus weifser Pappe blickte, erschien das farbige Licht auf den weifsen Schirm projiziert als ein inneres farbiges Feld. Der Schirm konnte mit Hilfe einer passend aufgestellten Lampe mit weifsem Licht beleuchtet werden, so dafs ich also, wenn ich den Gaszuflufs mit einem Quetschhahn regulierte, die Intensität des inneren und des äufseren Feldes in jedem Augenblick gleichzeitig ändern konnte.

Die Ergebnisse meiner Beobachtungen mit dieser Einrichtung bestätigten vollkommen die in den Tabellen V und VI enthaltenen. Wie in dem oben beschriebenen Versuch fixierte ich gleich von Anfang an die Mitte des inneren Feldes und fand, dafs eine Steigerung der Intensität beider Felder eine Farbe die dem Schwellenwert nahe war, sofort zum Verschwinden brachte, oder,

falls sie vorher über dem Schwellenwert sich befand, schwächer erscheinen lieſs. Andererseits konnte eine unter dem Schwellenwert liegende Farbe durch Abschwächung der Intensität beider Felder über den Schwellenwert hinaus gehoben werden. Ferner konnten, wie in dem oben beschriebenen Konstrastversuch auch grobe quantitative Beziehungen zwischen der Höhe der Schwellenwerte und der Intensität beider Felder festgestellt werden.

Herr Geheimrat v. Kries hatte die Güte an diesen beiden letzten Versuchen teilzunehmen und hat meine Beobachtungen bestätigen können.

Die Ergebnisse aller dieser Versuchsreihen können wir im folgenden zusammenfassen. Wenn die Helligkeit eines farbigen Feldes durch die Kontrastwirkung eines intensiver beleuchteten Hintergrundes herabgesetzt wird, steigt der Schwellenwert; und zwar geht die Erhöhung im groſsen und ganzen der Steigerung der Intensität des äuſseren Feldes über die des inneren hinaus parallel. Ein Sinken der Helligkeit des Hintergrundes unter die des farbigen Feldes schien unter den Versuchsbedingungen keine der Richtung nach bestimmte oder andauernde Wirkung auf die Schwellenwerte auszuüben. Wird dagegen die Intensität des inneren Feldes allein oder die beider Felder gleichzeitig geändert, so sinkt der Schwellenwert mit sinkender und steigt mit steigender Intensität. Wird also die Helligkeit des farbigen Feldes durch Kontrastwirkung herabgesetzt, so steigt der Schwellenwert, wird aber die eigene Intensität des farbigen Feldes vermindert, so sinkt er. Oder mit anderen Worten: wenn die Helligkeit eines farbigen Feldes oder seines Hintergrundes durch Hinzufügen von weiſsem Licht erhöht wird, steigt der objektive Schwellenwert in beiden Fällen, obgleich im ersten Fall subjektiv die Helligkeit des farbigen Feldes **erhöht** und der Sättigungsgrad der Farbe **vermindert** wird, während im zweiten umgekehrt die Helligkeit **vermindert** und der Sättigungsgrad **erhöht** wird. In keinem Falle aber lieſs sich aus den Ergebnissen der beschriebenen Versuche ein

zahlenmäfsig ausdrückbares Gesetz der Abhängigkeit der Schwellenwerte von den Intensitäten ableiten.

Dieses Ergebnis ist ein weiterer Beleg dafür, dafs die Beziehungen zwischen den Wirkungen des farbigen und des farblosen Lichts auf das Sehorgan in hohem Grade verwickelt sind, bei weitem verwickelter als die herrschenden Theorien über das Farbensehen vermuten lassen. Auch die Wirkung der sogen. „Umstimmung“ des Sehorgans durch farbloses Licht auf das Farbensehen steht zu den in den beschriebenen Versuchen gefundenen Tatsachen in enger Beziehung, und mufs bei einer Würdigung ihrer theoretischen Wichtigkeit mit in Betracht gezogen werden. Wenn nämlich ein Abschnitt der Netzhaut erst weifsem und dann farbigem Licht ausgesetzt wird, das sich eben über dem Schwellenwert befindet, so wird die Farbe dem Schwellenwert näher gebracht oder sogar unter ihn herabgedrückt. Diese Tatsache, die den Ergebnissen meiner Versuche ganz analog ist, erlaubt uns in der Aufstellung verallgemeinernder Sätze über die Wirkung der Erregung des Sehorgans durch weifses Licht auf das Farbensehen noch einen Schritt weiter zu gehen. Der Schwellenwert einer Farbe wird demnach für einen bestimmten Teil der Netzhaut erhöht, d. h. die Farbenempfindlichkeit wird herabgesetzt, wenn

1. dieser Teil kurz vorher durch weifses Licht umgestimmt worden ist,

2. wenn der Teil gleichzeitig durch farbiges und weifses Licht erregt wird,

3. wenn die unmittelbare Umgebung dieses Teils der Netzhaut gleichzeitig durch weifses Licht erregt wird, so dafs durch den Helligkeitskontrast das farbige Feld verdunkelt wird. Es läfst sich also wohl zusammenfassend behaupten, dafs wenn ein Teil der Netzhaut in den Wirkungskreis einer hellen weifsen Lichtquelle kommt seine Farbenempfindlichkeit dadurch beeinträchtigt wird.

Für eine theoretische Deutung der mitgeteilten Tatsachen fehlen uns meines Erachtens zu sehr die Unterlagen, als dafs es sich empfehlen könnte, darauf einzugehen. Nur darauf möchte ich hinweisen, dafs die gerade für die Auffassung der Kontrasterscheinungen besonders bevorzugte Theorie Herings hier auf

erhebliche Schwierigkeiten stöſst. Ihr zufolge sollte der Zustand der schwarz-weiſsen Sehsubstanz an einer Netzhautstelle sich jedenfalls in demselben Sinne ändern, wenn die Weiſsbelichtung dieser Stelle selbst vermindert, oder die der Umgebung vermehrt wird. Ferner sollen die Bedingungen für die Wahrnehmung der Farben am günstigsten sein, wenn der Zustand der schwarz-weiſsen Sehsubstanz ein Gleichgewicht von Assimilation und Dissimilation, ein neutrales Grau darstellt. Hiernach müſste man erwarten, daſs es wenigstens irgend welche Fälle geben werde, in denen wir nicht bloſs durch Verminderung des inneren, sondern auch durch Steigerung des äuſseren Weiſs, nicht bloſs durch objektive, sondern auch durch Kontrastverdunkelung die Bedingungen für das Farbenerkennen günstiger machen, die Farbenschwellen herabsetzen können. Ich habe aber etwas derartiges nie beobachtet; immer ist vielmehr der Erfolg der objektiven Weiſsverminderung in loco und der Kontrastverdunkelung der entgegengesetzte.

Es ist, wie ich glaube, nicht an der Zeit, eine Erklärung meiner Beobachtungen durch neue Annahmen über die Wechselwirkung benachbarter Netzhautteile zu versuchen. Doch kann man wohl sagen, daſs der allgemeine Eindruck, den die Tatsachen machen, dahin geht, uns die Substrate der Farbenempfindungen nicht in dem Maſse, wie es z. B. die Heringsche Theorie annimmt, von denjenigen der farblosen Empfindungen und demgemäſs auch von dem durch farbloses Licht hervorzurufenden Kontrastwirkungen unabhängig erscheinen zu lassen. In der Tat gewinnt man eigentlich unmittelbar den Eindruck, daſs die durch (farblose) Belichtung der Umgebung erzeugte Kontrastverdunkelung eben nicht bloſs eine Verschiebung der die farblose Helligkeit bestimmenden Vorgänge, sondern zugleich auch eine Verminderung der der Farbenempfindung dienenden darstelle, daſs sie ähnlich wirke wie eine Verminderung des g a n z e n Lichtes, von dem das kontrastleidende Feld getroffen wird, nicht aber wie eine Verminderung nur des in ihm enthaltenen Weiſs. Dieses Ergebnis ist demjenigen ganz analog, zu dem v. Kries bei seinen Versuchen über die Weiſsermüdung gelangt ist. Auf diese ganz allgemeine Bezeichnung der Richtung, in der die Tatsachen unsere Erwägungen zu lenken geeignet sind, glaube ich mich an dieser Stelle beschränken zu sollen.

Anhang.

Nachdem ich meine Versuche, die ich erst jetzt Gelegenheit finde zu publizieren, ganz abgeschlossen hatte, ist eine Arbeit von Révész[1] veröffentlicht worden, die ganz unabhängig und in sehr erfreulicher Weise mein Hauptresultat (dafs bei zunehmendem Helligkeitskontrast die Farbenschwelle steigen) bestätigt. Ihm ist es auch gelungen ein einfaches quantitatives Gesetz aufstellen zu können, dafs nämlich „der Wert der Farbenschwelle eine lineare Funktion der gegebenen Lichtstärke des kontrasterregenden Feldes ist".

Auf eine detailliertere Vergleichung der Révészschen Beobachtungen mit den meinigen hinsichtlich der Versuchsanordnung und Ergebnisse (insbesondere jenes numerischen Gesetzes) möchte ich hier nicht eingehen. Die Hauptsache ist jedenfalls, dafs wir eine Steigerung der Farbenschwelle bei zunehmender Weifsintensität des kontrasterregenden Feldes als ohne allen Zweifel festgestellt ansehen dürfen.

---

[1] Über die Abhängigkeit der Farbenschwellen von der achromatischen Erregung. *Zeitschr. f. Sinnesphysiol.* **41** (1). 1906.

Aus dem Physiologischen Institut zu Freiburg i. B.

Über die zur Erregung des Sehorgans erforderlichen Energiemengen.

Nach Beobachtungen von Herrn Dr. Eyster mitgeteilt

von

J. von Kries.

Wie bekannt, ist es zuerst Töpler und Boltzmann[1], später insbesondere Lord Rayleigh[2] und Wien[3] gelungen, die für eine merkliche Erregung des Gehörorgans erforderlichen Energiemengen in absolutem Maſse zu ermitteln. Die überraschenden Ergebnisse dieser Untersuchungen haben den Wunsch hervorgerufen, auch für das Sehorgan zu ähnlichen Feststellungen zu gelangen. Ein Versuch in dieser Richtung ist meines Wissens zuerst von Wien gemacht worden, der in seiner Dissertation „Über die Messung von Tonstärken" berechnet, daſs „die sichtbare Strahlung" der lichtschwächsten noch sichtbaren Sterne dem Auge eine Energie von etwa $4 \cdot 10^{-8}$ Erg in der Sekunde zuführt.

Neue Ermittlungen in dieser Richtung[4] konnten wohl angezeigt erscheinen, teils weil jener Berechnung nur anderweit bekannte Tatsachen, nicht direkt für diesen Zweck angestellte

---

[1] Töpler und Boltzmann: *Wiedemanns Annalen.* 116. S. 321. 1870.

[2] Rayleigh: Proceed. of the R. Society 26, S. 248. 1878. *Phil. Magazine* 10, S. 370. 1894.

[3] Wien, Diss., Berlin 1888. *Wiedemanns Annalen* 36, S. 849. 1889. *Pflügers Archiv* 97, S. 1. 1903.

[4] Ich hätte gewünscht hier in spezieller Weise auf die einer ähnlichen Aufgabe gewidmeten Versuche von Grijns und Noyons (*Engelmanns Archiv* 1905. S. 25) eingehen zu können. Leider ist es mir nicht gelungen von dem Verfahren und der Berechnung der genannten Autoren eine so sichere Vorstellung zu gewinnen, daſs ich mir ein Urteil über ihre Ergebnisse gestatten könnte.

Untersuchungen zugrunde lagen, besonders aber, weil für Versuche dieser Art gegenwärtig in verschiedenen Beziehungen günstigere Bedingungen gegeben sind. Ich habe daher Herrn Dr. Eyster veranlafst, Versuche dieser Art auszuführen; er hat mit Sorgfalt und Ausdauer die erforderlichen Beobachtungen durchgeführt, deren Ergebnisse ich nachstehend mitteile.

Was den Plan und die allgemeine Anordnung der Untersuchung anlangt, so ist zunächst als ein die Erreichung unseres Zieles sehr erleichternder Umstand anzuführen, dafs durch die Beobachtungen Angströms[1] die Verteilung der Energie im Spektrum eines genau bestimmten und leicht zugänglichen Normallichtes, nämlich der Hefnerlampe, festgestellt worden ist. Diese Bestimmungen bilden daher die physikalische Unterlage der folgenden Ermittlungen. Sodann aber haben sich unsere Kenntnisse über die Sichtbarkeitsbedingungen schwacher Lichter im letzten Jahrzehnt sehr vervollständigt; wir sind daher in der Lage, die für solche Versuche wünschenswertesten Modalitäten mit gröfserer Genauigkeit zu fixieren.

Zunächst wissen wir, dafs die Empfindlichkeit des Sehorgans gegenüber schwachen Lichtern an verschiedenen Stellen der Netzhaut (oder des somatischen Gesichtsfeldes nach Herings Ausdruck) eine sehr verschiedene ist, und dafs sie überdies in hohem Mafse von dem jeweiligen Zustande des Sehorgans abhängt. Will man die geringsten, überhaupt unter irgend welchen Umständen zu einer merklichen Erregung genügenden Energiemengen kennen lernen, so wird es also geboten sein im Zustande hochgradiger Dunkeladaptation zu beobachten und aufserdem Sorge zu tragen, dafs das auf seine Sichtbarkeit zu prüfende Licht nicht etwa im Fixationspunkt oder in seiner unmittelbaren Nähe sich befindet, sondern auf den die höchste Empfindlichkeit besitzenden exzentrischen Netzhautstellen abgebildet wird. Dafs diese Bedingung in den Beobachtungen, auf die die Angabe Wiens zurückgeht, annähernd erfüllt waren, ist wohl möglich; indessen erscheint es doch, da nicht absichtlich darauf Bedacht genommen worden ist, nicht sicher.

Von noch gröfserer Wichtigkeit ist der zweite hier anzuführende Punkt. Es ist schon lange bekannt, dafs die Wirkung

---

[1] K. Angström. Energie dans le spectre visible de l'étalon Hefner. Nova Acta Soc. scient. Upsala. III. 1903.

des Lichtes auf das Sehorgan abgesehen vom Energiewert auch von der Art der Strahlung (der Wellenlänge) abhängt. Energiewert und Sichtbarkeit können demzufolge in den allerverschiedensten Verhältnissen stehen. Ermittelt man also dieses Verhältnis für irgend einen Bereich von Wellenlängen, etwa das, was die Physiker schlechtweg die sichtbare Strahlung zu nennen pflegen, nämlich die gesamten Wellenlängen unter 760 $\mu\mu$, so erhalten wir einen Wert, der sich auf einigermafsen willkürlich gewählte Verhältnisse bezieht, und jedenfalls nicht den kleinsten, überhaupt zur Erregung des Sehorgans hinreichenden Energiewert. Um diesen zu erhalten, wird es vielmehr erforderlich sein, gerade diejenige Strahlung zu prüfen, die, unter diesem Gesichtspunkt betrachtet, als die günstigste bezeichnet werden kann, d. h. diejenige, die mit dem relativ geringsten Energiewert zu einer merklichen Erregung des Sehorgans führt. Bekannte Erfahrungen haben nun gelehrt, dafs auch in dieser Beziehung die Verhältnisse sehr wechselnde sind. Bei welcher Wellenlänge die kleinsten Energiemengen sichtbar werden, hängt in hohem Mafse vom Zustande des Sehorgans und auch davon ab, auf welche Teile desselben die Strahlung einwirkt. Als die nächstliegende und am schärfsten charakterisierte Aufgabe empfiehlt sich nun auch in dieser Beziehung die Untersuchung des dunkeladaptierten Auges auf mäfsig exzentrischen Stellen. Die Wirkungsstärke verschiedener Lichter ist unter diesen Umständen durch ihre Dämmerungswerte gegeben. Da die Verteilung dieser im Spektrum durch eine Reihe sorgfältiger und gut übereinstimmender Beobachtungen bekannt geworden, andererseits auch bereits durch die grundlegenden Versuche LANGLEYS die Verteilung der Energiewerte im Spektrum ermittelt worden war, so gestatteten die bekannten Tatsachen schon vordem diejenige Strahlung anzugeben, bei welcher (unter den Bedingungen des Dämmerungssehens) das Verhältnis der Sichtbarkeit zur Energie seinen höchsten Wert erreicht, oder einem bestimmten Energiebetrag der höchste Reizwert zukommt. Berechnungen dieser Art sind denn auch bereits wiederholt ausgeführt worden und zwar von KÖNIG[1] und von TRENDELENBURG.[2] Sie ergeben, dafs die zur Erregung des Sehorgans (unter den Bedingungen des

[1] HELMHOLTZ-Festschrift 1891. S. 359.

[2] *Diese Zeitschrift* 37, S. 41.

Dämmerungssehens) günstigste Strahlung auf etwa 505 $\mu\mu$ angesetzt werden kann. Dieser Punkt des Spektrums fällt, wie gleichfalls von den beiden genannten Autoren übereinstimmend ermittelt wurde, mindestens sehr annähernd mit demjenigen zusammen, an dem die Lichtabsorption im Sehpurpur ihren gröſsten Wert erreicht. Da es aus theoretischen Gründen für wahrscheinlich gelten kann, daſs in der Tat die vom Sehpurpur am stärksten absorbierte Strahlenart die am günstigsten wirkende sein wird, so wurde für unsere Versuche ein Licht von der (durchschnittlichen) Wellenlänge 507 $\mu\mu$ gewählt.[1]

Endlich kommt es bei der Abhängigkeit des physiologischen Erfolges von der Energiemenge sehr auf die räumliche und zeitliche Verteilung derselben an. In ersterer Beziehung ist die Gröſse des Feldes zu beachten, in letzterer die Einwirkungszeit, sofern man nicht (was auch zulässig erscheint) die Frage so stellt, daſs ermittelt werden soll, welche Energiemengen pro Zeiteinheit einwirken müssen, damit ein Licht (bei längerer Einwirkung) dauernd sichtbar ist. Auch in diesen Beziehungen ergeben uns eine Reihe von Beobachtungen der letzten Jahrzehnte genügende Anhaltspunkte, um die für unseren Zweck geeigneten Bedingungen festzusetzen. Was die Feldgröſse angeht, so haben die Versuche Pipers[2] ergeben, daſs bei etwas gröſseren Feldern die Erleuchtungsstärke, bei der die Sichtbarkeitsgrenze liegt, mit der Gröſse der Felder sinkt und zwar etwa der Seitenlänge umgekehrt proportional ist. Da die Feldgröſse und somit die dem Sehorgan zugeführten Energiemengen dem Quadrat der Seitenlänge proportional sind, so folgt, daſs die zur Erregung erforderlichen Energiemengen mit abnehmender Feldgröſse immer kleiner werden, m. a. W., daſs eine bestimmte Energiemenge um so günstiger wirkt, auf eine je kleinere Netzhautstelle sie konzentriert wird. Andererseits zeigen jedoch ältere Versuche, daſs, wie auch

---

[1] Gehen wir von den Vorstellungen der Duplizitätstheorie aus, so würden hier die geringsten zu einer Erregung des Stäbchenapparates erforderlichen Energiemengen ermittelt. Es wäre wohl nicht unmöglich, bei Wahl anderer passender Lichter und möglichst streng fovealer Beobachtung die analogen Bestimmungen auch für den Zapfenapparat auszuführen. Leider hat dem Herrn Beobachter seine Zeit nicht gestattet, diese (eine erheblich andere Technik erfordernde) Aufgabe auch noch in Angriff zu nehmen.

[2] *Diese Zeitschrift* 32. S. 98.

theoretisch zu erwarten, diese Art der Abhängigkeit bei weitgehender Verkleinerung der Felder ihre Grenze findet; sie wird zuletzt durch die andere ersetzt, dafs die erforderliche Helligkeit der Feldgröfse umgekehrt proportional ist. Innerhalb dieses Bereiches sehr kleiner Felder sind also die Produkte aus Feldgröfse und Helligkeit oder die zugeführten Energiemengen konstant; m. a. W.: die Sichtbarkeit einer bestimmten Energiemenge wird, wenn die Feldgröfse einmal unter einen gewissen Wert verkleinert ist, durch noch weitere räumliche Zusammendrängung nicht mehr begünstigt. Es ergibt sich hieraus, dafs, wenn wir die geringsten Energiemengen suchen, die unter den in dieser Hinsicht günstigsten Bedingungen eine merkliche Erregung des Sehorgans erzielen können, es nicht nötig ist, auf unmefsbar kleine Objekte (wie die Fixsterne) zurückzugehen, sondern eine Verkleinerung der Felder auf oder unter einen bestimmten Wert erforderlich, aber auch genügend ist. Nach den Angaben von Asher[1] würde das Gesetz der Konstanz der Energiemengen (also der umgekehrten Proportionalität zwischen Lichtstärke und Feldgröfse) bis zu einer Ausdehnung von zwei Bogenminuten gültig sein.

In vieler Hinsicht ähnlich liegen die Dinge für die zeitlichen Verhältnisse. Da die Vermehrung der Einwirkungszeit über einen gewissen Betrag hinaus der Sichtbarkeit nicht mehr erheblich zugute kommt, so wird die Erregung jedenfalls bei relativ kurzen Expositionszeiten mit kleineren Energiemengen möglich sein. Auch hier aber ist eine Grenze zu erwarten und durch ältere Versuche auch gefunden worden, unterhalb deren die erforderlichen Energiemengen sich nicht mehr weiter vermindern, vielmehr die Helligkeit der noch weiter abnehmenden Expositionszeit umgekehrt proportional vermehrt werden mufs. Nach den Beobachtungen von Charpentier[2] würde jene Grenze etwa bei $^1/_8$ Sek. (125 σ) zu suchen sein.

Im ganzen ergab sich somit für den Versuch die Anforderung, die Energiemengen zu ermitteln, die das Auge treffen, wenn (bei hochgradiger Dunkeladaptation und günstigster exzentrischer Beobachtung) Felder von ca. 2′ Ausdehnung während Zeiten von weniger als 125 σ von einem Lichte von 507 $\mu\mu$ durchschnittlicher

---

[1] *Zeitschr. f. Biologie* 17.

[2] *Arch. d'ophtalmologie* 10. 1890.

Wellenlänge und solcher Stärke erleuchtet werden, dafs das Objekt sich an der Grenze der Sichtbarkeit befindet.

Die allgemeine Einrichtung der Versuche war die, dafs mit Hilfe des im Freiburger Physiologischen Institut schon vielfach benutzten gradsichtigen Spektralapparats ein mit homogenem Licht erhelltes Feld hergestellt wurde, dessen Lichtstärke mittels eines, die Weite des Kollimatorspalts regulierenden, vom Beobachtungsplatze aus zu handhabenden Schnurlaufes einzustellen war. Der Spektralapparat war derart in die Öffnung einer die beiden optischen Zimmer trennenden Wand eingefügt und abgedichtet, dafs von der zu benutzenden, in dem einen Zimmer aufgestellten Lichtquelle nur das durch jenen Spalt und den Apparat hindurchgehende, aber kein direktes Licht in das andere Zimmer (in dem der Beobachter sich befand) dringen konnte. Durch den, in 1 m Abstand von der Objektivlinse angebrachten Okularspalt blickend, sah der Beobachter somit das mit homogenem Licht erhellte Feld auf tiefschwarzem Grunde. Der Okularspalt war in diesem Falle auf einer besonderen Vorrichtung angebracht, die im wesentlichen aus einem starken, horizontalliegenden Messingarm besteht, der mittels einer Tangentenschraube um eine senkrechte Achse drehbar ist, wobei die Verschiebungen an einer Kreisteilung mit Nonius abzulesen sind. Durch Aufsuchung derjenigen Punkte, bei denen die Li-, Na-, Tl- und Sr-Linie in der Mitte des Spalts sichtbar wurden, konnte der Apparat in bekannter Weise graduiert und der Okularspalt auf eine bestimmte Wellenlänge eingestellt werden.

Als Lichtquelle sollte aus den vorhin erwähnten Gründen jedenfalls die Hefnerlampe dienen. In welcher Weise sie zweckmäfsig zu benutzen sein würde, konnten allerdings erst die Versuche selbst lehren. Einige Vorversuche bestätigten (was sich im voraus vermuten liefs), dafs eine direkte Erleuchtung des Spalts durch die Lampe viel zu grofse Helligkeiten ergab. Passende Werte erzielten wir dagegen, wenn vor dem Objektivspalt ein weifses Papierblatt aufgestellt und in der Stärke von einigen M. K. beleuchtet war. Hieraus ergab es sich als wünschenswert so zu verfahren, dafs der Spalt sein Licht von einer weifsen Fläche erhielt, die aus mäfsigen Entfernungen durch die Hefnerlampe bestrahlt wird. Eine Berechnung der in das Auge gelangenden Energiemengen ist unter diesen Umständen, wie unten zu besprechen ist, mit genügender Annäherung möglich. Um

streng definierte Versuchsbedingungen zu haben, die immer wieder eine genau gleiche Herstellung und auch eine Kontrolle der für die Berechnung zu machenden Annahmen gestatten, wurde als weifse Fläche nicht ein Papierblatt oder Gypsplatte benutzt, sondern nach dem Vorgange Königs eine mit Magnesiumoxyd gleichmäfsig bedeckte Blechplatte.

Die Anordnung war dabei stets so, dafs diese Platten senkrecht stand und zwar unter 45° gegen die Achse des Kollimatorrohrs geneigt. Ferner wurde die Lichtquelle so aufgestellt, dafs die von ihr kommenden Strahlen gleichfalls unter 45° auf die Platte auftrafen. Der Abstand der Hefnerlampe von der weifsen Fläche konnte dann beliebig gewählt werden.

Die Feldgröfse konnte durch Vorsetzung von Diaphragmen verschiedener Gröfse vor die Objektivlinse leicht in beliebiger Weise hergestellt werden; ich habe kreisrunde Öffnungen von 1 bis 10 mm Durchmesser benutzt, die, aus der Entfernung von 97 cm gesehen, unter Winkeln von 3,5—35 Minuten erschienen.

Was die Normierung der zeitlichen Verhältnisse angeht, so erschien es, abgesehen von der technischen Bequemlichkeit auch aus Gründen der Beobachtung selbst unbedingt wünschenswert, periodisch wiederholte Reize zu benutzen. Denn gerade die regelmäfsige Wiederholung in einem bekannten Intervall bietet ein aufserordentlich wertvolles Hilfsmittel für die Gewinnung eines sicheren Kriteriums, ob ein Licht sichtbar ist oder nicht. Andererseits kann bei den hier benutzten Lichtstärken, bei denen die primären Reizerfolge an der Grenze der Sichtbarkeit stehen, von einer Störung durch die ihrem Betrage nach weit zurückbleibenden sekundären und tertiären Bilder wohl kaum die Rede sein, wenn die Periode der Wiederholung gröfser als eine Sekunde ist.

Wir benutzten daher eine vor dem Objektivspalt aufgestellte Scheibe, die einen auf wechselnde Gröfsen einzustellenden Sektorausschnitt besafs. Die Scheibe konnte durch einen Elektromotor mit Zentrifugalregulierung in langsame Rotation versetzt werden. Im allgemeinen liefsen wir sie eine Umdrehung p. Sek. machen, in einigen Versuchen auch nur eine Umdrehung in 4 Sek.

Da die Absicht der Versuche nicht dahin ging, die Empfindlichkeit einer bestimmten Netzhautstelle, sondern die überhaupt irgendwo vorhandene höchste zu ermitteln, so durften die Beobachtungen mit beliebig wanderndem Blick ausgeführt werden,

und es war von der Benutzung eines Fixierzeichens im eigentlichen Sinne abzusehen. Indessen erwies es sich doch schon bei den ersten orientierenden Versuchen als wünschenswert, in mäfsiger Entfernung von dem zu beobachtenden Felde ein immer sichtbares Lichtpünktchen anzubringen. Ohne es zu fixieren, wird der Beobachter durch ein solches doch stets darüber unterrichtet, wo das eigentliche Beobachtungsobjekt liegt, so dafs die Bestimmungen hierdurch sehr an Sicherheit gewinnen und erleichtert werden. Ein solches, natürlich auch nur wenig über der Sichtbarkeitsgrenze stehendes rotes Lichtpünktchen wurde daher in allen Versuchen benutzt.

Schliefslich ist noch anzuführen, dafs stets abwechselnd mit zunehmender Spaltweite der Punkt des Sichtbarwerdens und mit abnehmender Spaltweite der des Unsichtbarwerdens bestimmt wurde. Die in den folgenden Tabellen aufgeführten Zahlen sind die Mittelwerte aus je 10 Einstellungen der einen und der anderen Art, die abwechselnd ausgeführt wurden.

Was die spezielle Anordnung der Versuche angeht, so erschien es uns zweckmäfsig, nicht einfach unter fixierten Bedingungen zu wiederholten Malen Schwellenwerte aufzusuchen, sondern immer eine bestimmte Variierung, sei es der zeitlichen, sei es der räumlichen Verhältnisse (Feldgröfse) vorzunehmen. Einerseits liefsen sich dadurch suggestive Beeinflussungen mit gröfserer Sicherheit vermeiden. Andererseits ergab sich so auch die Möglichkeit über die Gültigkeit der vorhin erwähnten diesbezüglichen Gesetze aus eigener Anschauung ein Urteil zu gewinnen. Es wurden also in einigen Reihen die Expositionszeiten (durch wechselnde Einstellung des Schlitzes in der rotierenden Scheibe) unter Konstanterhaltung aller sonstigen Umstände verändert, in anderen ausschliefslich die Feldgröfse variiert.

Der ersteren Kategorie gehören die Tabellen 1 und 2 an. — Sie enthalten im ersten Stabe die Weite jenes Schlitzes, im 2. die Expositionszeiten, im 3. und 4. die für Unsichtbar- und Sichtbarwerden des Feldes eingestellten Spaltweiten (jede Zahl ist das Mittel von 10 Einstellungen), im 5. das arithmetische Mittel beider, in 6. endlich das Produkt aus diesem Werte und der Expositionszeit.[1] Man bemerkt, dafs in Tab. 1, die nur bis

[1] Über die Bedeutung der hier mit der Bezeichnung „Konstanter Koeffizient“ in Parenthese angeführten Zahlen vgl. u. S. 385.

Tabelle 1. (Vorversuche.)

Feldgröfse 10 mm. 5kerzige Glühlampe in 2 m Abstand.

Breite des umlaufenden Spalts	Expositionszeit ϑ in Sek.	Abgelesene Spaltweiten für Verschwinden des Objektes	Abgelesene Spaltweiten für Sichtbarkeit des Objektes	Mittel m.	Produkte ϑ m.
7,5	0,0075	67,2	85,4	76,3	0,572
15	0,015	50,6	65,0	57,8	0,867
22,5	0,0225	37,3	51,0	44,15	0,993
30	0,030	29,9	40,7	35,3	1,059
37,5	0,037	22,5	31,2	26,85	1,006
45	0,045	18,0	27,6	22,5	1,012
60	0,060	11,5	19,2	15,35	0,921
75	0,075	9,9	16,25	13,06	0,929
90	0,090	9,2	14,6	11,92	1,072

Tabelle 2.

Feldgröfse 3 mm. 1 Hefnerlampe in 25 cm Abstand.
Ein Umlauf der rotierenden Scheibe in 4 Sek. (Konstanter Koeff. 113.)

Breite des umlaufenden Spalts	Expositionszeit ϑ in Sek.	Eingestellte Spaltweiten für Verschwinden des Objektes	Eingestellte Spaltweiten für Sichtbarkeit des Objektes	Mittel m.	Produkte ϑ m.
3,12	0,0125	54,7	65,1	59,9	*0,799*
3,9	0,016	49,75	52,0	50,0	*0,780*
6,25	0,025	32,17	36,9	34,50	*0,862*
7,8	0,031	21,5	27,18	24,34	*0,753*
12,5	0,050	13,87	16,75	15,31	*0,765*
15,6	0,062	12,5	15,18	13,84	*0,855*
25,0	0,100	7,37	11,00	9,19	*0,919*
31,25	0,125	5,31	7,94	6,62	*0,825*
41,66	0,166	4,69	7,81	6,25	1,038
50,00	0,200	4,31	6,44	5,37	1,074
62,5	0,250	3,31	5,75	4,53	1,132
87,5	0,333	2,02	5,5	4,06	1,352
100,0	0,400	2,00	3,88	2,83	1,172
125	0,500	2,00	4,00	3,00	1,500
150,0	0,600	1,94	3,94	2,94	1,944

zu Expositionszeiten von 0,09 Sek. heraufgeht, die letztgenannten Zahlen annähernd konstant sind, also das oben besprochene Proportionalitätsgesetz in der Tat zutrifft.[1] Die über einen gröfseren Bereich sich erstreckenden Versuche der Tab. 2 lassen erkennen, dafs hier (in recht guter Übereinstimmung mit CHARPENTIER) das Gesetz der umgekehrten Proportionalität etwa bis zur Expositionszeit $^1/_8$ Sek. gültig ist. Bei noch weiterer Vermehrung derselben fangen, wie aus Tab. 2 ersichtlich, die Produkte von Zeit und Lichtstärke zu wachsen an. Immerhin geht bei Vermehrung der Einwirkungszeit die erforderliche Lichtstärke noch weiter, sicher etwa bis zu $^1/_2$ Sek. herunter. Hiernach liefs sich sagen, dafs wir uns bei Expositionszeiten bis zu $^1/_8$ Sek. sicher in demjenigen Bereiche befinden, in dem mit den relativ kleinsten Energiemengen eine Erregung erzielt wird.

Auf etwas gröfsere Schwierigkeiten sind wir bei der Variierung der Feldgröfsen gestofsen. Die in dieser Weise angeordneten Versuche sind in den Tabellen 3—7 enthalten, die, sonst ebenso

Tabelle 3.

Expositionszeit 0,03 Sek. 5 kerzige Glühlampe in 2 m Abstand.

Durchmesser des Feldes D.	Eingestellte Spaltweiten für Verschwinden des Objektes	Eingestellte Spaltweiten für Sichtbarkeit des Objektes	Mittel m.	Produkt ϑ m.	Produkt $\left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi$. m.
10	25,86	36,6	31,23	312,3	2452,8
8	36,67	42,4	39,55	316,4	1989,6
7	39,62	55,0	47,31	331,2	182[illegible],5
5	46,55	64,4	55,49	277,5	1137,9

Tabelle 4.

Expositionszeit 0,07 Sek. 1 Hefnerlampe in 50 cm Abstand (Koeff. 0,28).

Durchmesser des Feldes D.	Eingestellte Spaltweiten für Verschwinden des Objektes	Eingestellte Spaltweiten für Sichtbarkeit des Objektes	Mittel m.	Produkt ϑ m.	Produkt $\left(\frac{D}{2}\right)^2 \pi$. m.
10	5,2	11,2	8,2	82,0	644
2	78,4	95,0	86,7	173,4	*272,4*

[1] Ob die geringe Abweichung der Zahl für 15 und die stärkere für 7,5 σ als zuverlässig zu betrachten sind, darf wohl bezweifelt werden.

Tabelle 5.

Expositionszeit 0,05 Sek. 1 Hefnerlampe in 50 cm Abstand (Koeff. 0,2).

Durchmesser des Feldes D.	Eingestellte Spaltweiten des Objektes für Verschwinden	für Sichtbarkeit	Mittel m.	Produkt ϑ m.	Produkt $\left(\frac{D}{2}\right)^2\pi$. m.
10	6,75	11,73	9,24	92,4	725,7
8	11,62	16,4	14,01	112,08	704,2
7	15,57	19,33	17,45	122,15	671,1
5	26,85	30,31	28,61	143,05	562,8
2	78,1	90,30	84,21	168,42	*264,5*

Tabelle 6.

Expositionszeit 0,05 Sek. 1 Hefnerlampe in 25 cm Abstand (Koeff. 0,8).

Durchmesser des Feldes D.	Eingestellte Spaltweiten des Objektes für Verschwinden	für Sichtbarkeit	Mittel m.	Produkt ϑ m.	Produkt $\left(\frac{D}{2}\right)^2\pi$. m.
7	3,10	6,00	4,55	31,85	174,0
5	5,00	7,83	6,42	32,0	126,9
4	6,23	10,00	8,11	32,46	101,8
3	9,00	12,66	10,83	32,49	*76,5*
2	23,38	28,88	26,13	52,24	*82,36*

Tabelle 7.

Expositionszeit 0,05 Sek. 2 Hefnerlampen in 25 cm Abstand (Koeff. 0,6).

Durchmesser des Feldes D.	Eingestellte Spaltweiten des Objektes für Verschwinden	für Sichtbarkeit	Mittel m.	Produkt D. m.	Produkt $\left(\frac{D}{2}\right)^2\pi$. m.
3	6,33	10,35	8,54	25,6	*60,38*
1	72,00	79,33	75,66	75,6	*59,4*

eingerichtet wie die vorhin erwähnten, nur im 1. Stabe statt der Expositionszeiten die Durchmesser des erleuchteten Feldes (in Millimetern), im 5. das Produkt aus diesem Durchmesser und dem Mittel der eingestellten Spaltweiten, endlich im 6. das Produkt aus Spaltweite und der Flächengröfse des Feldes aufführen.

Bei dieser Einrichtung würde, wie man sieht, die Gültigkeit des Proportionalitätsgesetzes sich in einer Konstanz der Zahlen des 6. Stabes ausdrücken, während, wenn die von Piper aufgestellte Regel hier bereits zuträfe, sich dies durch die Konstanz der Werte des 5. Stabes kenntlich machen wird.

Überblickt man daraufhin die Tabellen 3—7, so zeigt sich, dafs die erforderlichen Energiemengen durch Verkleinerung des Feldes bis zu einem Durchmesser von etwa 3 mm abnehmen. Dagegen scheint mit 3 mm der kleinste Wert erreicht (Werte für 3 und 2 mm in Tab. 6, Werte für 3 und 1 mm in Tab. 7).

Über die Gültigkeit der Piperschen Regel für gröfsere Felder läfst sich hier ein sicheres Urteil nicht gewinnen. In Tab. 5 nehmen die Zahlen des 5. Stabes (bei sinkender Feldgröfse) deutlich zu, wonach die Abhängigkeit für diese (ja schon sehr kleinen Felder) zwischen der durch die Pipersche Regel ausgedrückten und dem Proportionalitätsgesetz in der Mitte liegen würde. Weniger deutlich ist dies in Tab. 3, wo der Wert des 5. Stabes für 5 mm Feldgröfse sogar wieder vermindert erscheint.

Da es wünschenswert erschien, unsere Ergebnisse mit den oben erwähnten Berechnungen Wiens vergleichbar zu machen, so wurden auch einige Bestimmungen über diejenigen Helligkeiten ausgeführt, die bei dauernder Erleuchtung des Feldes zu einer Sichtbarkeit desselben erforderlich sind. Die Werte, die hier erhalten wurden, sind in Tab. 8 und 9 enthalten.

Tabelle 8.

1 Hefnerlampe in 25 cm Abstand. Diaphragma 2 mm (konstanter Koeff. 50,2).

Expositionszeit ϑ	Eingestellte Spaltweiten f. Verschwinden des Objektes	Eingestellte Spaltweiten f. Sichtbarkeit des Objektes	Mittel m	Produkt ϑ m.
0,05 Sek.	22,1	27,3	24,7	*1,235*
Dauerexpos.	2,25	5,12	3,69	—

Tabelle 9.

1 Hefnerlampe in 25 cm Abstand. Dauerexposition. Diaphragma 1 mm.

Eingestellte Spaltweiten für Verschwinden des Objektes	Eingestellte Spaltweiten für Sichtbarkeit des Objektes	Mittel
15,19	23,06	19,12

Aus den obigen Tabellen können wir nun sogleich diejenigen Zahlen aussondern, die zur Berechnung der unter den günstigsten Bedingungen erforderlichen Energiemengen geeignet sind. Es sind dies diejenigen Werte die in den obigen Tabellen durch Kursivschrift hervorgehoben sind. Ich stelle im folgenden diese Zahlen zusammen, jedoch so, dafs die in den Tabellen enthaltenen Werte jedesmal noch mit Rücksicht auf die für die ganze Tabelle konstant geltenden Bedingungen (Lichtstärke und Feldgröfse in dem einen, Lichtstärke und Expositionszeit in dem anderen Falle) umgerechnet sind. Die hierfür erforderlichen aus den jedesmaligen Versuchsbedingungen sich ergebenden Koeffizienten sind bereits über jeder Tabelle mit der Bezeichnung „Konstanter Koeffizient" hinzugefügt worden. Die folgenden Zahlen bedeuten also alle Produkte aus Beleuchtungsstärke (in Meterkerzen), Expositionszeit in Sekunden, Feldgröfse in mm^2 und abgelesenen Spaltweiten (in 0,01 mm). Es berechnet sich so aus Tabelle 2 (Durchschnitt der ersten 8 Werte) 92,0, Tab. 4 76,2, Tab. 5 52,9, Tab. 6 61,2 und 65,9, Tab. 7 96,6 und 95,0, Tab. 8 62,1.

Ferner entnehmen wir den Tabellen 8 und 9 als Werte für die Sichtbarkeit bei dauernder Exposition die Zahlen 186 und 239, als Produkte aus Beleuchtungsstärke, Feldgröfse (in mm^2) und abgelesenen Spaltweiten (in Hundertstel mm).[1]

Für die Berechnung der unter unseren Versuchsbedingungen das Auge treffenden Energiemengen dienen uns, wie oben schon erwähnt, die Ermittelungen Angströms. Ihnen zufolge repräsentiert die „sichtbare Strahlung" ($\lambda < 760\ \mu\mu$) die von der Hefnerlampe eine Fläche von 1 cm^2 im Abstand von 1 m trifft eine Energie von $20{,}6 \cdot 10^{-8}$ Grammcalorien p. Sek., einen Wert, den wir mit E bezeichnen wollen. Auch geben die Bestimmungen an, welche Bruchteile dieses Wertes auf bestimmte Bereiche der

---

[1] Diese Werte sind niedriger als ich erwartet hatte. Wenn, wie es Charpentier angibt, eine Vermehrung der Expositionszeit über $^1/_8$ Sek. der Sichtbarkeit nicht mehr merklich zugute käme, so müfste man erwarten, bei Dauerexposition etwa das 8 fache der bei kurzen Expositionszeiten gefundenen Mengen als Energiezufuhr per Sekunde zu erhalten. Die obigen Werte belaufen sich aber nur auf das 2—3 fache jener Beträge. Darin spricht sich aus, dafs auch die Vermehrung der Einwirkungszeit über $^1/_8$ Sek. eine Verminderung der Intensität gestattet, wenn auch nicht in dem vollen Betrage der umgekehrten Proportionalität.

Wellenlänge kommen. A. gibt hierfür die von ihm mit J bezeichneten und in seiner Tabelle 4 im letzten Stabe angeführten Werte, die nach der den Beobachtungen sehr befriedigend entsprechenden Formel $J_\lambda = 0{,}0160\ \lambda^{-5}\ e^{-\frac{7{,}85}{\lambda}}$ berechnet sind. Die Bedeutung dieser Formel ist die, dafs die auf einen kleinen Bereich von Wellenlängen $\varDelta\lambda$ von dem durchschnittlichen Betrage λ entfallende Energiemenge $= 0{,}0160\ \lambda^{-5}\ e^{-\frac{7{,}85}{\lambda}}\ \varDelta\lambda$ cal. ist, wo $\varDelta\lambda$ in μ anzugeben ist.

Um von dieser Formel Gebrauch zu machen, haben wir zu ermitteln, ein wie grofser Bereich von Wellenlängen gemäfs der angewandten Breite des Okularspaltes ins Auge gelangt. Dies wurde bestimmt, indem der Objektivspalt mit Natriumlicht erleuchtet und sodann ermittelt würde, um wie viel der Okularspalt verschoben werden mufste, um die Natriumlinie von einem zum anderen Rande des Okularspaltes wandern zu lassen. Es ergab sich, dafs hierfür eine Verschiebung auf der oben erwähnten Teilung von 16′ erforderlich war, woraus sich, da der Abstand Tl. Sr $= 11^0\ 23'$ gefunden war, für die Spaltbreite ein Bereich der Wellenlängen von 1,7 $\mu\mu$ berechnet. In unseren Versuchen betrug daher die durchschnittliche Wellenlänge des benutzten Lichtes 507 $\mu\mu$ und der B e r e i c h der ins Auge gelangenden Wellenlängen 1,7 $\mu\mu$. Hierfür berechnet sich der in Betracht kommende Energiewert nach der obigen Formel auf 1,5012 10^{-10}, welchen Wert wir mit F bezeichnen (ca. $\frac{1}{1360}$ derjenigen Energie, die der gesamten s i c h t b a r e n Strahlung zukommt).

Lassen wir diesen Punkt einstweilen noch beiseite und behalten die ganze Energie der sichtbaren Strahlung im Auge, so würde 1 cm² unserer Magnesiumoxydfläche, da sie unter 45^0 gegen die auffallenden Strahlen geneigt ist, E cos 45^0 cal. per Sek. erhalten.

Die Berechnung der von der Fläche zurückgeworfenen Strahlung ist leider mit einigen Unsicherheiten behaftet, die jedoch im Hinblick auf den hier verfolgten Zweck nicht von grofsem Belang sind. Man bezeichnet, wie bekannt, für einen rauhen Körper das Verhältnis der gesamten zurückgeworfenen zur auftreffenden Strahlung als seine Albedo. Dieser, natürlich stets durch einen echten Bruch dargestellte Wert ist für verschiedene

weifse Körper öfters bestimmt worden. ZÖLLNER[1] erhielt für weifses Papier 0,7, für frisch gefallenen Schnee 0,78, KANONOWITSCH[2] für weifses Papier 0,825. Nach den Beobachtungen von PERTZ[3] ist eine Magnesiumoxydfläche etwa um $^1/_5$ heller als gewöhnliches weifses Schreibpapier, etwa um 10 % heller als das weifseste im Handel erhältliche (sog. Baryt-)Papier. Wir werden danach keinen grofsen Fehler machen, die zurückgeworfenen Energiemengen wohl eher schon zu hoch als zu niedrig veranschlagen, wenn wir sie, wie wir tun wollen, mit 0,9 der auftreffenden in Rechnung bringen.

Wir müssen sodann eine Annahme darüber machen, wie die Ausstrahlung sich auf die verschiedenen Richtungen verteilt, m. a. W. wie ihr Wert in einer bestimmten Richtung von dem Winkel abhängt, den diese Richtung mit der Normalen des betreffenden Flächenelementes einschliefst. Nach dem LAMBERTschen Grundgesetz haben wir auch hier eine Proportionalität mit dem Kosinus des genannten Winkels anzunehmen Allerdings haben nun neuere Untersuchungen[4] gezeigt, dafs jenem Gesetze nur eine approximative Gültigkeit zukommt. Da indessen die Abweichungen von ihm nicht sehr beträchtlich sind und von vielerlei Bedingungen in einer zurzeit noch nicht erschöpfend bekannten Weise abhängen, so empfiehlt es sich hier für unseren Zweck ohne Zweifel am meisten, uns an die einfache, von jenem Grundgesetz ausgehende Berechnung zu halten. Setzen wir hiernach die Strahlung auf ein Flächenelement, dw, der um das lichtaussendende Element beschriebenen Einheitskugel $= C \cdot dw \cdot \cos \alpha$, so können wir den Wert der Constante C aus dem der ganzen Ausstrahlung zukommenden Gesamtbetrage ermitteln. Auf eine zwischen den Neigungswinkel α und $\alpha + d\alpha$ eingeschlossene Zone wird nämlich die Energie $C \cdot 2 \sin \alpha \cdot \pi \cdot d\alpha \cdot \cos \alpha$ treffen. Diesen Wert haben wir von $\alpha = 0$ bis $\alpha = \frac{\pi}{2}$ zu integrieren, um die Gesamtstrahlung zu erhalten.

---

[1] ZÖLLNER, Photometrische Untersuchungen. Leipzig, 1865.

[2] KANONOWITSCH; zitiert bei BRODHUN, Photometrie in WINKELMANNS Handbuch der Physik 6, S. 751.

[3] PERTZ, Photometrische Untersuchungen über die Schwellenwerte der Lichtreize. Diss. Freiburg. 1896.

[4] WRIGHT. *Drudes Annalen* 1. S. 12. 1900 wo die ältere Literatur angeführt ist.

Es ergibt sich also $C\,\pi \int\limits_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha \, d\alpha = G^1$, oder da der Wert des Integrals $\int\limits_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \sin \alpha \cos \alpha \, d\alpha = 1$ ist, $C\pi = G^1$, wo G^1 die ganze von dem Element ausgestrahlte Energiemenge wäre, und $C = \frac{G^1}{\pi}$. Ist G die dem Element zugestrahlte Energiemenge, so wäre $G^1 = 0{,}9\, G$. Danach würde ein Element unserer weifsen Fläche, wenn es die Energiemenge G erhält, in dem kleinen körperlichen Winkel dw und in einem gegen die Normale unter dem Winkel α geneigten Richtung die Energiemenge $0{,}9\, G \frac{dw}{\pi} \cos \alpha$ ausstrahlen (in senkrechter Richtung $0{,}9\, G \frac{dw}{\pi}$).

Auch für die weitere Berechnung der ins Auge gelangenden Energiemengen wollen wir zunächst von der prismatischen Zerlegung des Lichts absehen und annehmen, das von dem Objektivspalt entworfene reelle Bild sei so schmal, dafs es ganz in den Okularspalt falle. Unter diesen Umständen würde in das Auge ein schmaler Lichtstreifen fallen, dessen Breite sich durch diejenige des Objektivspalts, und dessen Höhe sich durch die Pupillenweite bestimmen würde. In Ermangelung direkter auf das Auge des Beobachters bezüglicher Bestimmungen habe ich für letztere auf Grund der Messungen Gartens[1] den Wert von 8 mm angenommen. Wenn man die Vergröfserung kennt, mit der der Objektivspalt in der Ebene des Okularspalts abgebildet wird, so berechnet sich diejenige Höhe am ersteren, die diesen 8 mm entspricht. In unserem Falle ergab eine Messung, dafs der Objektivspalt mit einer Vergröfserung 1 : 4,2 abgebildet wurde. Somit würde eine Fläche (am Objektivspalt) von 1,90 mm Höhe und den als Spaltweiten gemessenen Beträgen als Breite ihr Licht in das Auge gelangen lassen. Ich will diese Fläche die wirksame Spaltfläche nennen und mit S^1 bezeichnen.

Um die von dieser Fläche her ins Auge des Beobachters gelangenden Lichtmengen anzugeben, können wir von folgender

[1] *Pflügers Archiv* 68. 1897.

Erwägung ausgehen. Da gemäfs bekannten optischen Sätzen die ins Auge gelangende Lichtmenge unabhängig von der Entfernung ist, in der die weifse Fläche vom Spalt aufgestellt ist[1], so können wir, indem wir diese Entfernung uns gleich Null gemacht denken, sagen, dafs die Verhältnisse ebenso sind, wie wenn an der Stelle des Objektivspaltes, jedoch parallel ihrer wirklichen Lage ein Stück der leuchtenden Fläche von der Gröfse $\frac{S^1}{\cos 45^0}$ angebracht wäre. Da aber von diesem das in den Apparat gelangende Licht unter einem Emissionswinkel von 45^0 ausgehen würde, so erhalten wir, wenn G die der Flächeneinheit der weifsen Tafel zugestrahlte Energie ist, für die in den Apparat eindringende den Wert $G \cdot S^1 \cdot 0{,}9 \frac{k}{\pi}$, wo k den körperlichen Winkel bedeutet mit dem jedes Element des Objektivspaltes zufolge der Gröfse des Diaphragmas wirksam wird; und es würde sich weiter darum handeln, diesen Winkel zu ermitteln.

Auch dies ist ohne Schwierigkeit auszuführen. Wenn nämlich das Diaphragma vom Okularspalt aus unter einem körperlichen Winkel k' erscheint, so ist den Gesetzen der Abbildung

[1] Die Unabhängigkeit der Beleuchtung von dem Abstand der weifsen Fläche erhellt am einfachsten, wenn man erwägt, dafs sich die gesamte das Diaphragma passierende Lichtmenge durch Verschiebung der weifsen Tafel nicht ändert, weil einerseits die Gröfse des Flächenstückes, von dem ein Element des Diaphragmas bestrahlt wird, andererseits der körperliche Winkel unter dem dies Element von der leuchtenden Fläche aus gesehen erscheint (also der Bruchteil der gesamten Strahlung den es erhält), immer in entgegengesetztem Sinne und in gleichem Verhältnis ändern. Es möge a_1 der Abstand des Objektivspaltes von dem durch die optischen Einrichtungen entworfenen Bilde des Diaphragmas sein, k der Winkel unter dem ein bestimmtes Element dieses Diaphragmenbildes von der Ebene des Objektivspaltes aus gesehen erscheint, S^1 die wirksame Fläche des Objektivspaltes. Liegt alsdann die leuchtende Fläche in der Ebene des Objektivspaltes, so wird jenes Element des Diaphragmas eine Lichtmenge erhalten, die S^1 und k proportional ist. Stellen wir die Tafel in den Abstand a_2 vom Objektivspalt, so wird dasselbe Element von einem Stück der leuchtenden Fläche bestrahlt, das im Verhältnis $\frac{(a_1 + a_2)^2}{a_1^2}$ vergröfsert ist, während andererseits der körperliche Winkel unter dem das betrachtete Element nun von der Ebene der Tafel aus gesehen erscheint $= k \frac{a_1^2}{(a_1 + a_2)^2}$ wird, so dafs in der Tat die jenes Element passierende Lichtmenge die nämliche bleibt. Das gleiche gilt natürlich für das ganze Diaphragma.

zufolge diejenige Lichtmenge, die vom Objektivspalt aus durch dasselbe hindurchgeht, gleich derjenigen, die von diesem unter einem körperlichen Winkel k ausgeht $= k' \alpha^2$, wo α die Vergröfserung bedeutet, mit der der Objektivspalt in der Ebene des Okularspaltes abgebildet wird. Dieser Wert betrug, wie oben erwähnt, 4,2. Da die Diaphragmen 970 mm vom Okularspalt abstanden, so ergibt sich als Wert des gesuchten körperlichen Winkels $\frac{O}{970^2}\, 4{,}2^2$, wo O die Fläche des Diaphragmas (in mm^2) bedeutet.

Eine letzte an der obigen Berechnung noch anzubringende Korrektion betrifft den Lichtverlust, der durch Reflexion und Absorption in den optischen Apparaten (Kollimator- und Objektivlinse, sowie gradsichtiges Prisma) stattfindet. Eine Bestimmung dieser, voraussichtlich nicht ganz unbeträchtlichen Schwächung erschien wünschenswert und konnte auf die folgende Weise ausgeführt werden. Wenn wir von einer lichtaussendenden Fläche durch eine Linse ein (reelles oder virtuelles) Bild entwerfen, so ist bekanntlich das Bild in demselben Verhältnis gegenüber dem Objekt vergröfsert resp. verkleinert, in dem andererseits der Öffnungswinkel, in dem das Bild zufolge der Linsenöffnung Licht aussendet, im Vergleich zu demjenigen, unter dem ein Punkt des Objektes Licht in die Linse schickt, verkleinert resp. vergröfsert ist. Hieraus ergibt sich, wie bekannt, dafs wir ein solches Bild niemals in gröfserer Helligkeit sehen können als das Objekt selbst bei direkter Betrachtung erscheint. Vielmehr kann die gesehene Helligkeit des Bildes derjenigen des Objektes bei direkter Betrachtung gleichkommen unter zwei Voraussetzungen. Die erste ist die, dafs der von jedem Punkte des Bildes ausgesandte Lichtkegel noch grofs genug ist um die ganze Pupille auszufüllen. Die zweite ist die, dafs kein Lichtverlust durch Reflexion und Absorption in dem abbildenden Instrumente stattfindet. Stellt man hinter einem Diaphragma eine hinreichend grofse gleichmäfsig beleuchtete weifse Fläche auf, so bemerkt man leicht, dafs sich die Helligkeit in der die Öffnung gesehen wird nur in sehr geringem Mafse verändert, wenn man irgend eine beliebige Linse hinter dem Diaphragma anbringt. Diese Verminderung beruht ausschliefslich auf dem Lichtverlust durch Spiegelung und Absorption und kann als Mafs für ihn benutzt werden. Das gleiche gilt auch,

wenn man eine gleichmäfsige Fläche durch ein Prisma betrachtet, für alle Teile, die von den Rändern weit genug entfernt sind, um rein weifs zu erscheinen. Auf Grund dieser optischen Gesetze liefs sich die Lichtschwächung durch Spiegelung und Absorption in den optischen Apparaten leicht ermitteln. Es war nur nötig, nach Entfernung des Okular- und des Objektivspaltes das (nunmehr farblos) erscheinende Diaphragma in seiner Helligkeit zu bestimmen und zwar erstlich während die in den Versuchen benutzten optischen Apparate (Kollimator- und Objektivlinse, sowie geradsichtiges Prisma) sich an Ort und Stelle befinden, sodann nachdem dieselben fortgenommen sind, in welchem letzteren Falle der Beobachter die Fläche direkt, ohne Zwischenschaltung irgendwelcher Gläser sah. Man verfuhr zu diesem Zweck so, dafs die das Licht durchlassende Öffnung in einem w e i f s e n undurchsichtigen Schirm angebracht wurde, der nun seinerseits durch eine im Beobachtungszimmer aufgestellte Lampe beleuchtet wurde. Es konnte dann in dem einen und anderen der erwähnten Fälle (Beobachtung mit und ohne die optischen Apparate) diejenige Lampenentfernung gesucht werden, bei der Fleck und Umgebung gleich hell erscheinen. Als Mittel aus einer gröfseren Zahl von Einstellungen fand sich in dem einen Falle ein Lampenabstand von 185 cm, in anderen von 250 cm erforderlich, woraus sich die gesuchte Lichtschwächung $= \left(\frac{185}{250}\right)^2 = 0{,}548$ berechnet.

In möglichst übersichtlicher Weise in eine Formel zusammengefafst ergibt sich also die ins Auge gelangende Energiemenge $= \vartheta\, L \cos 45^0\, S^1\, \frac{O}{970^2}\, \frac{4{,}2^2}{\pi}\, 0{,}9\, \varepsilon \cdot 1{,}501\, 10^{-10}$ cal. In dieser Formel bedeutet ϑ die Expositionszeit in Sekunden,

L die Stärke der Beleuchtung unserer weifsen Fläche (in Meterkerzen),

S^1 die wirksamen Spaltflächen, d. h. das Produkt aus Spaltbreite und derjenigen Höhe, deren Bild am Okularspalt der Pupillenweite gleichkommt, in cm^2,

O die Gröfse des erleuchteten Diaphragmas in mm^2, somit $O/970^2$ den körperlichen Winkel, unter dem diese Öffnung vom Okularspalt gesehen erscheint und $O/970^2 \cdot 4{,}2^2$ den körperlichen Winkel, den die vom Objektivspalt ausgehende jene Öffnung passierende Strahlung einnimmt;

0,9 die angenommene Albedo der benutzten weifsen Fläche,

ε die Schwächung der Strahlung durch Lichtzerstreuung und Absorption in den optischen Apparaten,

während endlich der Wert $1{,}5010 \cdot 10^{-10}$ cal. diejenige Energiemenge bezeichnet, die nach Angströms Bestimmungen die Hefnerlampe auf 1 cm^2 im Abstande von 1 m pro Sekunde in Form einer Strahlung entsendet, deren Wellenlänge zwischen 506,15 und 507,85 $\mu\mu$ liegt.

Um auf Grund dieser Formel die obigen Ergebnisse zu berechnen, müssen wir noch berücksichtigen, wie sich die wirksamen Spaltflächen S^1 aus den abgelesenen Spaltweiten ergeben. Wie wir sahen, ist die Höhe der wirksamen Spaltfläche = 1,9 mm Die in den Tabellen aufgeführten Zahlen stellen die Spaltweiten in Hundertstel-Millimetern dar. Nennen wir diese S, so ist daher die wirksame Spaltfläche (in cm^2) $= 1{,}9 \cdot S \cdot 10^{-4}$.

Wir erhalten daher schliefslich die Formel

$$\vartheta \cdot L \cdot \cos 45^0 \; 1{,}9 \cdot S \cdot 10^{-4} \; \frac{O}{970^2} \; \frac{4{,}2^2}{\pi} \; 0{,}9 \cdot \varepsilon \cdot 1{,}501 \; 10^{-10}.$$

(in der S die abgelesenen Spaltweiten in Hundertstel-Millimetern bedeutet).

Die oben angeführten aus den Versuchen entnommenen und etwa zwischen 50 und 100 sich bewegenden Werte sind nun, wie dort erwähnt, die Produkte aus Expositionszeit (in Sekunden), Beleuchtungsstärke, abgelesenen Spaltweiten (in Hundertstel-Millimeter und Diaphragmengröfse (in mm^2). Sie geben also die Produkte von $\vartheta \cdot L \cdot S \cdot O$ und wir haben, um die uns hier interessierenden Energiewerte zu erhalten, sie mit einem Faktor zu multiplizieren, der sich $= \cos 45^0 \cdot 1{,}9 \cdot \frac{4{,}2^2}{970^2 \cdot \pi} \cdot 0{,}9 \cdot \varepsilon \cdot 1{,}501 \; 10^{-14}$ cal ergibt. Dieser berechnet sich auf

$6{,}36 \; 10^{-20}$ cal. oder, da 1 cal $= 419 \cdot 10^5$ Erg. ist $= 2{,}66 \; 10^{-12}$ Erg.

Wir finden demnach für die zur Erregung des Sehorgans erforderlichen Energiemengen Werte, die sich auf rund $130—260 \times 10^{-12}$ oder $1{,}3—2{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg. belaufen.

Was ferner die Verhältnisse der Dauerexposition anlangt, so fanden sich hier (als Produkt aus Beleuchtung, Feldgröfse und Spaltweite) die Zahlen 189 und 235, im Mittel 212. Unter Benutzung der obigen Berechnung ergibt sich für die Sichtbarkeit eines dauernd exponierten Lichtes hier eine Strahlung, die dem Auge $212 \cdot 2{,}66 \cdot 10^{-12} = 5{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg. pro Sekunde zuführt.

Das Resultat der obigen Versuche und der daran geknüpften Berechnungen fasse ich im folgenden kurz zusammen.

1. Für eine merkliche Erregung des Sehorgans ist bei Herstellung der günstigsten Bedingungen hinsichtlich Adaptation, Strahlungsart (507 $\mu\mu$) räumlicher und zeitlicher Verhältnisse eine Energiemenge von $1{,}3$—$2{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg. erforderlich.

2. Für die Sichtbarkeit dauernd exponierter Objekte ergibt sich bei günstigster Strahlungsart und günstigster räumlicher Anordnung eine Energiezuführung von ca. $5{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg. pro Sekunde.

Es ist nicht ohne Interesse, diese letzteren Werte und die eingangs erwähnten Angaben Wiens in einen etwas genaueren Vergleich zu bringen. Wie man sieht, betragen unsere Werte etwa $^1/_{70}$ des von Wien gefundenen ($400 \cdot 10^{-10}$ Erg. pro Sekunde). Der Hauptunterschied der Beobachtungsbedingungen ist ja nun der, daſs wir die günstigste Strahlung 507 $\mu\mu$ benutzten, während dort gemischtes Licht beobachtet und die Energie der ganzen sichtbaren Strahlung der Rechnung zugrunde gelegt wurde.

Die Bedeutung dieses Umstandes lieſse sich zahlenmäſsig bewerten, wenn wir anzugeben in der Lage wären, wie groſse Bruchteile einerseits von dem Dämmerungswert, andererseits von dem Energiewert der sichtbaren Strahlung auf den von uns benutzten günstigsten Lichtbereich kommt, und zwar in dem Licht eben jener Sterne, auf die die Angaben Wiens sich beziehen. Da diese Strahlung des genaueren nicht bekannt ist, so ist dies nicht streng ausführbar. Immerhin ist es von Interesse, über die betreffenden Werte sich einigermaſsen zu orientieren, was für Sonnenlicht auf Grund der Bestimmungen von Langley (hinsichtlich der Energie), von Schaternikoff (hinsichtlich des Dämmerungswertes) möglich ist. Nach einer approximativen Schätzung dürfte im Sonnenlicht etwa $^1/_{200}$ des Energiewertes und $^1/_{50}$ des Dämmerungswertes der ganzen sichtbaren Strahlung auf unseren Lichtbereich entfallen. Hiernach würde in der ganzen sichtbaren Strahlung des Sonnenlichtes auf gleichen Dämmerungswert ca. vierfach mehr Energie kommen, als in unserem grünen Lichte; und es lieſs sich danach erwarten, daſs bei Benutzung unzerlegten Sonnenlichtes die eben sichtbaren Lichter in der ganzen sichtbaren Strahlung nur einen etwa vierfach gröſseren Energiebetrag besitzen werden als die gleichfalls an der Grenze der Sichtbarkeit stehenden, qualitativ günstigsten Lichter. Für

Licht von der Beschaffenheit des Gas- und des Hefnerlichts wird nun zwar dieser Wert jedenfalls höher sein, doch dürfte er, wie man schätzungsweise ermitteln kann, auch hier kaum über 25 hinausgehen. Hiernach darf man wohl sagen, dafs der Unterschied der hier erhaltenen und der von Wien berechneten Werte nur zum Teil auf diesen Umstand zurückzuführen ist; auch abgesehen hiervon haben wir hier noch beträchtlich niedrigere Schwellenwerte erzielt. Man wird dies nicht gerade überraschend finden können; denn abgesehen von den hier ja recht erheblichen individuellen Verschiedenheiten sind wohl die hier eingehaltenen Versuchsbedingungen, die Beobachtung eines einzelnen, vom Beobachter in seiner Stärke zu regulierenden Objekts, wesentlich günstiger als sie für die Wahrnehmung einzelner sehr lichtschwacher und im allgemeinen von zahlreichen helleren umgebener Sterne bestehen.

(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Über physiologische Methoden zur Prüfung der Zusammensetzung gemischter Lichter.

Von

Marie Boehm.

Bekanntlich ändert sich bei elektrischen Glühlampen, wenn sie mit wechselnder Spannung und Stromstärke brennen, nicht nur die Helligkeit, sondern auch die qualitative Beschaffenheit des ausgesendeten Lichtes; je stärker sie brennen, um so weifser wird das Licht, um so mehr wird das Stärkeverhältnis zweier Lichter von bestimmten Wellenlängen zugunsten des kurzwelligeren Lichtes verschoben. Das Licht einer bestimmten Lampenart ist daher ein qualitativ nicht genau definiertes. Hierin liegt ein bei physikalischen wie physiologischen Versuchen vielfach störend empfundener Übelstand, und es kann wohl in mancher Hinsicht als erwünscht bezeichnet werden, die Qualität eines vorgelegten Lichtes irgendwie messend festzustellen oder auch nach Wunsch ein Licht von genau bestimmter Qualität herzustellen. In voller physikalischer Allgemeinheit betrachtet ist dies eine Aufgabe von grofser Schwierigkeit. Zur Charakterisierung irgend eines Lichtes wäre es erforderlich, die Stärke zu ermitteln, mit der jede Lichtart in ihm vertreten ist, also etwa die Verteilung der Energie in einem bestimmten Spektrum durch bolometrische Beobachtungen festzustellen. Wäre man im Besitz eines qualitativ bestimmten, immer wieder in gleicher Zusammensetzung herzustellenden Normallichtes, so könnte die qualitative Prüfung irgend eines anderen Lichtes durch eine, auf eine passende Anzahl von Lichtern erstreckte spektrophotometrische Vergleichung mit jenem Normallicht erfolgen.

Einfacher als zu einer solchen systematischen Durchprüfung des ganzen Spektrums wird man zu einer Vergleichung nur zweier Lichtarten, etwa eines lang- und eines kurzwelligen gelangen können. Und in gewissem Umfange wird ohne Zweifel auch eine solche schon von grofsem Wert sein. Wären wir z. B. in der Lage, das Verhältnis der Energiewerte anzugeben, die (im Dispersionsspektrum) einerseits dem Natrium-, andererseits dem blauen Strontiumlicht zukommen, so wird es allerdings zweifelhaft sein, ob alle gemischten Lichter bei Übereinstimmung dieses Verhältnisses auch *durchweg* hinsichtlich der Energieverteilung übereinstimmen. Aber wir würden wohl anzunehmen berechtigt sein, dafs eine bestimmte Glühlampe, vermutlich auch alle Glühlampen derselben Art qualitativ gleiches Licht liefern, wenn jenes Verhältnis auf einen bestimmten Wert gebracht ist. Auch eine Ermittelung dieser Art ist nach den in der Physik üblichen auf das Bolometer zurückgehenden Methoden mit nicht ganz geringen Schwierigkeiten behaftet. Aus diesem Grunde ist es für die hier in Betracht kommenden Aufgaben der Lichtprüfung und Lichtvergleichung wohl von einigem Interesse, dafs wir unter Benutzung physiologischer Verhältnisse relativ leicht zu entsprechenden Ergebnissen gelangen können. In den nachstehend mitgeteilten Versuchen habe ich mir die Aufgabe gestellt, die qualitative Änderung des Lichtes einerseits von Kohlenfaden-Glühlampen, andererseits von Nernstlampen unter Benutzung physiologischer Verfahrungsweisen zu verfolgen.

Ermittelungen dieser Art sind bei dem gegenwärtigen Stande der Dinge unter doppeltem Gesichtspunkt von Interesse. Einerseits werden uns ihre *Ergebnisse* einen Anhalt geben, um zu beurteilen, wie hoch die Schwankungen der Lichtqualität bei wechselnder Brennstärke sind, und wie weit diese z. B. bei den tatsächlich vorkommenden unregelmäfsigen Schwankungen der Zentralenspannung als Fehlerquellen zu fürchten sind. Andererseits wird es in rein *methodischer* Beziehung von Interesse sein, zu erfahren, wie weit in dieser Richtung die Leistung der in Rede stehenden physiologischen Methoden geht, und da, wie sogleich zu besprechen, deren mehrere zu Gebote stehen, in welchem Verhältnis die Genauigkeitsgrade derselben stehen.

Ich beginne mit einer kurzen Darlegung der für unseren Zweck in Frage kommenden Verfahrungsweisen; es sind deren

hauptsächlich drei. Die erste will ich als Methode der Dämmerungswerte bezeichnen. Wie bekannt, sehen wir alle Lichter, sofern ihre Stärke unterhalb eines gewissen Wertes bleibt, farblos; dabei können aber, namentlich wenn das Auge gut dunkeladaptiert ist, nicht ganz unbeträchtliche Grade subjektiver Helligkeit erreicht werden. Man bezeichnet bekanntlich ein unter diesen Bedingungen stattfindendes Sehen als Dämmerungssehen, die den verschiedenen Lichtern unter diesen Umständen zukommenden Reizwerte als ihre Dämmerungswerte. Wir besitzen in ihnen eine bestimmte, allen Lichtern zukommende und unter geeigneten Bedingungen leicht zu beobachtende Wirkung und es ist daher leicht ersichtlich, wie wir von ihr für den hier verfolgten Zweck Gebrauch machen können. Wir können z. B. das Verhältnis der *D*-Werte eines lang- und eines kurzwelligen Lichtes im Dispersionsspektrum einer Lichtquelle ermitteln. Dieses Verhältnis wird sich mit wechselnder Brennstärke ändern; und indem wir es für verschiedene Brennstärken ermitteln, erfahren wir, wie sich das Verhältnis der dem einen und dem anderen Lichte zukommenden Energie geändert hat. Auch wird uns die Aufsuchung derjenigen Spannung, bei der jenes Verhältnis einen bestimmten vorgeschriebenen Wert besitzt, in die Lage setzen ein Licht von bestimmter Qualität herzustellen. Als ein Vorteil dieser Methode darf hervorgehoben werden, dafs die Dämmerungswerte, soweit bis jetzt bekannt, für alle Personen in der gleichen Weise von der Wellenlänge abhängen, die Bestimmungen verschiedener Beobachter also ohne weiteres untereinander vergleichbar sein würden. Als ein gewisser Nachteil darf von vornherein die Beschränkung der Beobachtungen auf die Bedingungen des Dämmerungssehens hervorgehoben werden, womit einerseits eine Anzahl technischer Unbequemlichkeiten verknüpft ist, andererseits auch eine Herabsetzung der Beobachtungssicherheit zu befürchten sein wird.

Die physiologischen Untersuchungen haben gelehrt, dafs ähnlich wie durch die Bedingungen des Dämmerungssehens auch noch auf andere Weisen die Gesichtsempfindungen ihres farbigen Charakters beraubt werden können. Farbige Objekte (auch hoher, spektraler Sättigung) erscheinen farblos, wenn sie stark exzentrisch gesehen werden und wenn sie in sehr kleinen Feldern zur Beobachtung kommen. Auch unter diesen Umständen sind die Reizwerte verschiedener Lichter einwandsfrei

vergleichbar; sie werden als Peripheriewerte[1] und als Minimalfeldhelligkeiten[2] bezeichnet. Beide Verhältnisse könnten, ganz allgemein gesprochen, für unsere Aufgabe herangezogen werden. Indessen haben schon die ersten hierher gehörigen Beobachtungen von v. Kries gelehrt, dafs das Verhältnis der Peripheriewerte zweier Lichter in hohem Mafse vom Adaptationszustande des Auges abhängt; nur bei höchstgradiger Helladaptation erhält man annähernd fixierte Verhältnisse. Um brauchbare Resultate zu erhalten, müfsten demgemäfs sehr erschwerende Bedingungen in die Versuche eingeführt werden; ich habe daher dieses Verfahren als wenig geeignet ganz beiseite gelassen. Von der eben erwähnten Schwierigkeit ist man frei, wenn man das Farbloserscheinen der farbigen Lichter durch Reduktion auf ein sehr kleines Feld bewirkt. Nach den Beobachtungen von Siebeck kann man die Minimalfeldhelligkeiten spektraler Lichter mit leidlicher Genauigkeit vergleichen, wenn man sie in Feldern von etwa 2′ Ausdehnung darbietet und mit einer Exzentrizität von etwa 1°,5 betrachtet. Er fand insbesondere, dafs man unter diesen Umständen von Adaptationsschwankungen nicht erheblich abhängig ist. Neben der Methode der Dämmerungswerte habe ich daher an zweiter Stelle die der Minimalfeldhelligkeiten benutzt.

Es ist ersichtlich, dafs, wenn wir für ein lang- und ein kurzwelliges Licht das Verhältnis ihrer Minimalfeldhelligkeiten bestimmen, wir auch hierin einen Wert haben, der ebenso wie das Verhältnis der Dämmerungswerte zur Charakterisierung einer Lichtart verwendet werden kann. Als ein gewisser Nachteil dieses Verfahrens kann angeführt werden, dafs die vorhin für die Dämmerungswerte bemerkte Unabhängigkeit von der Individualität des Beobachters hier nicht in vollem Mafse behauptet werden kann. Ob für Personen mit ganz normalem Farbensinn in dieser Hinsicht Unterschiede bestehen, läfst sich zurzeit nicht mit völliger Sicherheit angeben. Dagegen ist es von den Peripheriewerten bekannt und daraufhin für die Minimalfeldhelligkeiten sehr wahrscheinlich, dafs sie für Dichromaten und anomale Trichromaten sich mehr oder weniger anders als für normale Personen verhalten werden.

---

[1] v. Kries: *Diese Zeitschrift* **15**. S. 250.
[2] Siebeck: *Diese Zeitschrift* **41**. S. 89.

Die eben erwähnten Verfahrungsweisen stimmen darin überein, dafs bei ihnen zwei Lichter ungleicher Wellenlänge durch besonders gewählte physiologische Verhältnisse hinsichtlich eines Erfolges streng vergleichbar gemacht werden. Auf einem anderen Prinzip beruht dann eine an dritter Stelle hier anzuführende Verfahrungsweise. Wir können nämlich davon ausgehen, dafs die Gemische zweier Lichter einen von dem Mischungsverhältnis abhängigen physiologischen Erfolg haben. Auch hierdurch kommen wir in die Lage bestimmte Mengenverhältnisse zweier Lichter festzulegen; wir können ermitteln, wie sich das in einem bestimmten Spektrum gegebene Stärkenverhältnis zu dem in solcher Weise physiologisch definierten verhält, mit anderen Worten wie sich, wenn wir die Stärken, mit denen sie in einem bestimmten Spektrum vertreten sind, als Einheiten nehmen, das zur Erzielung eines bestimmten physiologischen Erfolges erforderliche Mischungsverhältnis zahlenmäfsig ausdrückt. Wären wir z. B. im Besitze eines objektiv hinlänglich genau definierten Weifs, so könnten wir einfach auf das Verhältnis rekurrieren, in dem ein bestimmtes langwelliges Licht mit seiner Komplementären gemischt werden mufs, um eine jenem Weifs gleich erscheinende Mischung zu liefern. In Ermangelung eines solchen Normalweifs können wir aber die Fälle in Betracht ziehen, in denen eine Mischung zweier homogener Lichter einem dritten homogenen (also durch seine Wellenlänge streng definierten) gleich erscheint. Als der für unsere Zwecke geeignetste Fall dieser Art bietet sich die in neuerer Zeit viel benutzte sog. Rayleigh-Gleichung. Dies ist bekanntlich eine Gleichung zwischen einem homogenen Licht von der Wellenlänge des Na-Lichtes und einem Gemisch von Lichtern, die dem Lithium- und Thalliumlicht entsprechen. Bei einem bestimmten Mengenverhältnis des lang- und des kurzwelligen Bestandteils erscheint die Mischung dem homogenen Gelb genau gleich. In diesem Gleicherscheinen haben wir in der Tat die Fixierung eines bestimmten Stärkeverhältnisses zweier verschiedener Lichter. Ändert sich die Beschaffenheit der Lichtquelle, so wird die Einstellung der die Lichtmischung bewirkenden optischen Apparate geändert werden müssen, um das Gemisch wiederum dem Na-Gelb gleich erscheinen zu lassen.

Als ein Vorteil dieses Verfahrens kann in Anspruch genommen werden, dafs die Beobachtung auf etwas gröfseren

9*

Feldern und mit der Stelle des deutlichsten Sehens stattfinden kann, die Bedingungen also für die Erzielung gröfserer Genauigkeit günstige sind. Als nachteilig erscheint dagegen zunächst, dafs die beiden Lichter, die verglichen werden, relativ nahe beieinander liegen, wobei natürlich geringere Änderungen im Stärkeverhältnis zu erwarten sind, als wenn wir zwei im Spektrum möglichst weit auseinander liegende Lichter vergleichen. Sodann ist als ein Übelstand hier von vornherein in Betracht zu ziehen, dafs die Rayleigh-Gleichungen, wie aus vielfältiger Erfahrung bekannt ist, auch für Personen mit normalem Farbensinn recht erhebliche individuelle Verschiedenheiten aufweisen; für anomale Trichromaten weichen sie noch erheblicher ab; Dichromaten aber (partiell Farbenblinde) können sie, da ihnen die hier in Betracht kommenden Farbenunterschiede nicht wahrnehmbar sind, überhaupt nicht einstellen; für diese wird also die Methode überhaupt nicht brauchbar sein.

Bevor ich zur spezielleren Darstellung meiner Versuche übergehe, mag noch vorausgeschickt werden, dafs ich zur Variierung der Brennstärken in allen Fällen einen Ruhstratschen Widerstand benutzte, der durch Verstellung des Schiebers von 0 bis zu 1000 Ohm eingestellt werden konnte. Die Lampen wurden unter Einschaltung dieses Widerstandes an die städtische Zentrale angeschlossen. Zugleich wurde an der Zuleitung ein (gleichfalls Ruhstratsches) Voltmeter derart angebracht, dafs die Klemmspannung an der Lampe abgelesen werden konnte. Das Instrument, von 190 bis 230 gehend und in halbe Volt geteilt, gestattete die Spannung, mit der die Lampe brannte, auf 0,1 V. abzulesen. Da die Spannung der Zentrale um mehrere Volt unregelmäfsig wechselt, so mufste die Widerstandseinstellung während eines Versuches häufig kontrolliert werden.

Bei dem als Methode der Dämmerungswerte bezeichneten Verfahren wollte ich aus naheliegenden Gründen von einem Lichterpaar ausgehen, das in dem benutzten Spektrum und bei dem Licht einer mit normaler Spannung (220 Volt) brennenden Glühlampe dämmerungsgleich wären. Solcher Lichterpaare stehen natürlich unendlich viele zur Verfügung; die Wahl eines bestimmten ist in gewissem Mafse willkürlich. Einerseits empfahl es sich nun zwei im Spektrum möglichst weit auseinanderliegende Lichter zu wählen; andererseits ist es jedoch nicht ratsam mit dem langwelligen Licht sehr

weit gegen Rot hin vorzugehen, weil man dort bekannten Tatsachen zufolge, wenn man die Sichtbarkeit der Farbe mit Sicherheit ausschliefsen will, auf sehr niedrige Dämmerungswerte beschränkt ist, die Beobachtung mit sehr geringen Helligkeiten aber nicht empfehlenswert erscheint. Ich habe daher als langwelliges Licht Na-Licht gewählt; die Vergleichung dieses mit einem ihm unter den erwähnten Ausgangsbedingungen dämmerungsgleichen bildete den Gegenstand der Beobachtung.

Was die speziellere Versuchsanordnung anlangt, so benutzte ich den im Freiburger physiologischen Institut bereits häufig verwendeten und auch mehrfach beschriebenen geradsichtigen Spektralapparat, der in der gleichfalls schon öfter beschriebenen Weise in die Wand zwischen zwei Dunkelzimmern eingefügt war. Der Kollimatorspalt erhielt sein Licht von einer Magnesiumoxydfläche, die vor ihm aufgestellt war, und aus passender Entfernung von der zu untersuchenden Lampe bestrahlt wurde. Im Beobachtungszimmer sah man in bekannter Weise, durch den Okularspalt blickend, ein Diaphragma mit einem beliebigen homogenen Licht erleuchtet. Vor der Linse wurde ein weifses Papierblatt mit einer Öffnung von 5 mm Durchmesser angebracht. Dieses Papierblatt wurde nun seinerseits durch eine im Beobachtungszimmer aufgestellte kleine Glühlampe mit Milchglasplatte und Irisblende beleuchtet. Die Aufgabe des Beobachters bestand im allgemeinen darin, den Kollimatorspalt (mit Benutzung eines Schnurlaufes) so einzustellen, dafs die mit dem homogenen Licht erleuchtete Öffnung der Umgebung dämmerungsgleich erschien, also weder als heller, noch als dunkler Fleck wahrnehmbar war. — Den speziellen hier verfolgten Zwecken entsprechend benutzte ich in diesem Falle z w e i Okularspalten von gleicher Breite, die auf demselben Stabe verschiebbar angebracht waren. Von ihnen wurde zunächst der eine auf Na-Licht eingestellt und für ihn eine Dämmerungsgleichung eingestellt. Nachdem dies geschehen, konnte der andere Spalt so gestellt werden, dafs man, durch ihn blickend, ebenfalls den Fleck verschwinden sieht und er wird alsdann aus dem Spektrum das dem Na-Licht dämmerungsgleiche brechbarere Licht ausschneiden. Ich habe diese Einstellungen eine gröfsere Anzahl von Malen wiederholt und auf die sich hiernach berechnende Mittelstellung wurde dann der zweite Spalt endgültig gebracht. — Die eigentlichen Versuche bestanden nun darin, dafs für veränderte Lichtquellen dasjenige

(nunmehr im allgemeinen von 1 abweichende) Verhältnis der Kollimatorspaltweiten ermittelt wurde, bei dem das mit dem gelben und mit dem blauen Lichte erleuchtete Feld der Umgebung und somit untereinander dämmerungsgleich wurden. Um übrigens den Versuchen eine gröfsere Sicherheit zu geben, habe ich die Einstellungen auch für die normal brennende Lampe immer wiederholt und mit denen bei veränderter Spannung abwechselnd ausgeführt. Endlich wäre noch zu erwähnen, dafs, wenn die Lampe durch Einschaltung von Widerstand auf eine geringere Brennstärke gebracht wurde, ich sie immer der zu beleuchtenden Magnesiumoxydfläche so weit annäherte, dafs die Beleuchtung für Na-Licht etwa wieder die gleiche war, so dafs niemals mit sehr erheblich differierenden Spaltweiten gearbeitet wurde. Die Ergebnisse der mit einer Kohlenfadenglühlampe angestellten Versuche sind in der nachstehenden, ohne weitere Erläuterung verständlichen Tabelle zusammengestellt. Jede hier aufgeführte Zahl ist das Mittel aus 10 Einzeleinstellungen. Man sieht, dafs für normale Brennstärke, entsprechend der im voraus gemachten Ermittelung mit gröfster Annäherung sich = 1 herausstellt. Für Spannungen von 210, 200 und 190 Volt ändert sich das Verhältnis auf 0,941 bzw. 0,895 und 0,838.

Tabelle 1.

Kohlenfadenlampe.

220 V.		210 V.		200 V.		190 V.	
Verhältnis der Spaltweiten für L_1 u. L_2	Verhältnis der Dämmerungswerte von L_1 u. L_1	Verhältnis der Spaltweiten für L_1 u. L_2	Verhältnis der Dämmerungswerte von L_1 u. L_2	Verhältnis der Spaltweiten für L_1 u. L_2	Verhältnis der Dämmerungswerte von L_1 u. L_2	Verhältnis der Spaltweiten für L_1 u. L_2	Verhältnis der Dämmerungswerte von L_1 u. L_2
$\frac{Sp. L_1}{Sp. L_2}$	$\frac{D. L_1}{D. L_2}$	$\frac{Sp. L_1}{Sp. L_2}$	$\frac{D. L_1}{D. L_2}$	$\frac{Sp. L_1}{Sp. L_2}$	$\frac{D. L_1}{D. L_2}$	$\frac{Sp. L_1}{Sp. L_2}$	$\frac{D. L_1}{D. L_2}$
1,018	0,982	0,937	1,067	0,901	1,110	0,841	1,189
1,006	0,994	0,946	1,057	0,908	1,101	0,833	1,200
1,002	0,998	0,943	1,060	0,899	1,112	0,831	1,203
1,003	0,997	0,955	1,047	0,882	1,134	0,844	1,185
1,000	1,00	0,924	1,082	0,885	1,130	0,839	1,190
1,006	0,994	0,941	1,063	0,895	1,117	0,838	1,193

Es ergibt sich also, dafs mit abnehmender Brennstärke das Verhältnis der Energiewerte des blauen zu dem gelben Lichte

bei 210 Volt auf 0,941, bei 200 Volt auf 0,895 und bei 190 Volt auf 0,838 des bei 220 Volt bestehenden Wertes gesunken ist. Man kann hieraus zunächst entnehmen, daſs bei unregelmäſsigen Schwankungen in der Spannung der Zentralen, bei denen selten mehr als 4 Volt Abweichung (herauf und herunter) von den vorgeschriebenen 220 stattfinden, das Stärkeverhältnis der beiden hier in Betracht gezogenen Lichter nur etwa um zwei Prozent schwanken dürfte (da eine Änderung um ca. 16 Prozent erst auf eine Spannungsverminderung um 30 Volt kommt).

Um für die Genauigkeit der Beobachtungen ein Maſs zu erhalten, habe ich in einer gröſseren Zahl von Einstellungen die mittlere Abweichung vom Durchschnitt ausgerechnet. Im Mittel aller Versuchsreihen betrug die mittlere Abweichung 2,6 Prozent der abzulesenden Spaltweiten. Wir können demgemäſs den Wert des hier eingeschlagenen Verfahrens zur Beobachtung der qualitativen Lichtveränderungen in der Weise ausdrücken, daſs wir sagen: die mittlere Abweichung der Einzelbeobachtung beträgt etwa 17 Prozent der ganzen, bei Verminderung der Spannung von 220 auf 190 Volt eintretenden Änderung.

Bei der Anstellung der entsprechenden Versuche mit einer Nernstlampe zeigte sich sogleich, was auch schon die Beobachtung mit freiem Auge lehrt, daſs die qualitative Änderung des Lichtes hier weit weniger beträchtlich ist. Ich habe mich daher, unter Fortlassung der Zwischenstufen, auf die Vergleichung von 220 und 190 Volt beschränkt. Die hier erhaltenen Ergebnisse enthält die folgende Tabelle. Da hier dieselben beiden Lichter benutzt wurden, wie sie für die Glühlampe gewählt worden waren, so ist natürlich das Verhältnis der Spaltweiten, wegen der abweichenden Zusammensetzung des Lichtes der Nernstlampe auch für normale Spannung nicht $= 1$, sondern hat entsprechend der weiſseren Farbe dieses Lichtes einen höheren Wert. Man sieht, daſs das hier in Frage kommende Verhältnis sich im Durchschnitt aller Reihen von 1,278 auf 1,206 also um 6 Prozent ändert. Die mittlere Abweichung der Einzeleinstellungen belief sich hier etwas höher, auf 3,7 Prozent der ganzen Werte. Bei der ganzen Änderung, die der variierten Brennstärke der Nernstlampe entspricht, macht sie nicht weniger als 62 Prozent $\left(\frac{3,7}{6}\right)$ aus. Die ganze Änderung des Nernstlichtes geht also nur wenig

Tabelle 2.

Dämmerungswerte.

Nernstlampe.

220 V.		190 V.		Verhältnis der mittl. Abweichung zur abgelesenen Spaltweite
Verhältnis der Spaltweiten für L_1 u. L_2 $\frac{Sp. L_1}{Sp. L_2}$	Verhältnis der Dämmerungswerte von L_1 u. L_2 $\frac{D. L_1}{D. L_2}$	Verhältnis der Spaltweiten für L_1 u. L_2 $\frac{Sp. L_1}{Sp. L_2}$	Verhältnis der Dämmerungswerte von L_1 u. L_2 $\frac{D. L_1}{D. L_2}$	$\frac{m. A.}{Spaltweite}$
1,275	0,784	1,231	0,812	0,055
1,357	0,737	1,306	0,766	0,036
1,319	0,758	1,366	0,732	0,044
1,327	0,754	1,158	0,864	0,028
1,282	0,780	1,157	0,864	0,034
1,294	0,774	1,170	0,855	0,037
1,250	0,8	1,178	0,849	0,041
1,257	0,796	1,191	0,840	0.039
1,213	0,824	1,153	0,867	0,034
1,211	0,826	1,149	0,870	0,025
1,2785	0,7833	1.2059	0,8319	0,0373

über das hinaus, was wir mit diesem Verfahren überhaupt nachweisen können.

Die Methode der Minimalfeldhelligkeiten kann genau wie diejenige der Dämmerungswerte behandelt werden; indessen steht hier, eben wegen der Kleinheit der erforderlichen Felder auch noch ein anderes Verfahren zu Gebote, bei dem zwar auf eine zahlenmäfsige Bewertung der Qualitätsänderungen verzichtet wird, das aber dafür für die Einstellung bestimmter Qualitäten oder für die Erkennung von Abweichungen eine gröfsere Genauigkeit verspricht. Ich habe daher geglaubt, dies bevorzugen zu sollen. Es ist dasjenige, das Lummer und Brodhun bei ihrem Kontrastphotometer benutzt haben. Bekanntlich wird hier davon ausgegangen, dafs man die Helligkeit zweier Felder genauer als bei direkten Vergleichungen durch die Vergleichung ihrer (sehr geringen) Abweichungen von dem sie umgebenden Grunde beobachten kann.

Um dieses Prinzip hier anzuwenden, ist es erforderlich, gleichzeitig zwei, von verschiedenen homogenen Lichtern er-

leuchtete Felder auf weifsem Grunde erscheinen zu lassen, wobei dann darauf einzustellen wäre, dafs beide sich nur wenig und gleich deutlich von der Umgebung abheben. Dieser Anforderung war insoweit leicht zu genügen, als es leicht gelingt, zwei solche verschiedene Lichter aussendende Fleckchen herzustellen. Es war zu diesem Zweck nur notwendig, dem vor der Linse angebrachten Papierblatt zwei Öffnungen (in passendem Abstand) zu geben und hinter jede derselben ein sehr kleines ablenkendes Prisma zu bringen, derart, dafs das die eine und die andere Öffnung passierende Licht in entgegengesetzten Richtungen abgelenkt wird. Auf den Okularspalt fallen unter diesen Umständen zwei gegeneinander verschobene Teilspektren und der durch ihn blickende Beobachter sieht die beiden Fleckchen mit verschiedenen Lichtern erhellt. Unter diesen Umständen ist nun die Helligkeit der beiden kleinen Felder nicht unabhängig variierbar. Dagegen können wir auf Gleichheit der beiden Fleckchen durch Verschiebung des Okularspalts einstellen, wodurch wir die beiden Lichter (ohne ihren Abstand im Spektrum zu ändern) nach der einen oder anderen Seite des Spektrums verschieben. Verschiebung gegen das rote Ende wird das langwellige Licht dunkler, das kurzwellige heller machen, umgekehrt Verschiebung gegen das violette Ende. Wir können daher, indem wir den Abstand der beiden Lichter konstant lassen, durch Verschiebung beider diejenige Lage im Spektrum aufsuchen, wo sie gleich hell erscheinen. In der Tat zeigte es sich, dafs es sehr gut gelingt, auf Gleichheit der Flecken und zwar auf gleichen Kontrast mit der Umgebung einzustellen und dafs, wie zu erwarten, die hierzu erforderliche Einstellung eine andere wird, wenn das die Spektren liefernde Licht seine Zusammensetzung ändert. Im einzelnen wurde so verfahren, dafs ich durch Regulierung der Fensterbeleuchtung die Helligkeit des Grundes auf einen passenden Wert brachte. Dann wurde durch Bewegen des Okularspalts eine vorläufige Einstellung auf annähernd gleiche Helligkeit der Fleckchen gemacht; sodann mufste durch Verstellung des Kollimatorspalts die Helligkeit beider Fleckchen passend reguliert werden, am besten so, dafs sie beide ein klein wenig heller als der Grund waren. Unter diesen Umständen genügt dann eine sehr geringe Verschiebung des Okularspalts, um die Abhebung der Fleckchen gegen die Umgebung ungleich zu machen. Während der Helligkeitsüberschufs des einen sich

verstärkt, wird der des anderen geringer, es wird (wenn man den Kontrast von vornherein klein gewählt hat) ganz unsichtbar und erscheint bei noch etwas gröſserer Verschiebung als dunkler Fleck. Für die Änderung der Lichtqualität haben wir in der erforderlichen Verschiebung des Okularspalts ein sehr genaues, aber wie oben schon bemerkt, nur willkürliches Maſs, da wir zunächst nicht in der Lage sind anzugeben, welche Änderung des Stärkeverhältnisses einer bestimmten Verschiebung entspricht. Um die Bewegungen des Okularspalts mit der hier erforderlichen Präzision ausführen und ablesen zu können, war derselbe auf einem um eine senkrechte Achse drehbaren metallenen Träger befestigt, der durch eine Tangentenschraube bewegt und dessen Verschiebung an einer Kreisteilung mit Nonius abgelesen wurde. Die in der folgenden Tabelle enthaltenen Zahlen bedeuten die an dieser Kreisteilung gemachten Ablesungen.

Tabelle 3.

Nernstlampe.

Okularspaltstellung bei 220 V.	Okularspaltstellung bei 190 V.	Differenz
0° 33,8′	0° 27,9′	0° 5,9′
0° 35,8′	0° 27,7′	0° 8,1′
0° 35,0′	0° 27,3′	0° 7,7′
0° 36,1′	0° 28,9′	0° 7,2′
0° 36,85′	0° 25,9′	0° 10,95′
0° 35,35′	0° 26,8′	0° 8,7′
0° 35,25′	0° 27,0′	0° 8,25′
0° 34,95′	0° 27,7′	0° 7,25′
0° 35,0′	0° 27,2′	0° 7,8′
0° 35,39′	0° 26,76′	0° 8,63′

Wie man sieht, beläuft sich die Stellungsänderung des Okularspalts, die einem Wechsel der Spannung von 220 auf 190 Volt entspricht, durchschnittlich 8′,63. Die mittleren Abweichungen der einzelnen Einstellungen betrugen nun hier 2′,83. Das gesuchte Genauigkeitsmaſs läſst sich also hier dahin angeben, daſs die mittlere Abweichung etwa 32,8 % derjenigen Änderung gleichkommt, die der Verminderung der Brennstärke von 220

auf 190 V. entspricht. Die Methode übertrifft also die der Dämmerungswerte an Genauigkeit.

Obwohl die genaue Bestimmung der beiden hier gleich hell erscheinenden Lichter nicht direkt im Versuchsplan lag, habe ich die Feststellung derselben doch für nützlich gehalten. Diese war ein wenig erschwert, weil wenigstens mit der Möglichkeit zu rechnen war, dafs durch die kleinen ablenkenden Prismen die Dispersion verändert (bei dem einen vermehrt, bei dem anderen vermindert) würde. Ich habe daher die Lage der Metalllinien nochmals für die beiden (durch das eine und andere kleine Prisma hindurchgegangenen) Spektren bestimmt und danach die Wellenlängen berechnet, die sich für diejenige Lage des Okularspalts ergeben, bei der für die mit 220 Volt brennenden Nernstlampe die Felder gleich erschienen. Ich erhielt hierfür die Wellenlängen 735 und 505 $\mu\mu$.

Über das von der Rayleigh-Gleichung ausgehende Verfahren ist in technischer Beziehung nur wenig zu bemerken. Die Beobachtungen wurden am Helmholtzschen Farbenmischapparat ausgeführt, dessen eines Kollimatorrohr mit dem für die Lichtmischungen dienenden Doppelspat ausgerüstet war. Dieser wurde so eingestellt, dafs die beiden (dem ordentlichen und dem aufserordentlichen Spektrum zugehörigen und zueinander senkrecht polarisierten) Lichter Lithium- und Thalliumlicht waren. Das Mengenverhältnis der beiden Bestandteile wird durch Drehung des Nicolschen Prismas verändert und ist den Tangensquadraten der Nicolstellungen proportional. Der andere Kollimator war auf Na-Licht gestellt. Der Beobachter sah somit die rechte Hälfte des Gesichtsfeldes mit dem homogenen gelben Licht, die linke mit der veränderlichen Rot-Grün-Mischung erleuchtet und konnte durch Nicoldrehung und Variierung eines Spalts die Rayleigh-Gleichung einstellen. Wie zu erwarten, ändert sich die erforderliche Nicolstellung merklich, wenn die die Mischung liefernde Lampe infolge geänderter Brennstärke ein verändertes Licht aussendet.

Die hier gewonnenen Ergebnisse enthalten die Tabellen 4 und 5, von denen die ersten die mit der Kohlenfaden-, die zweiten, die mit der Nernstlampe ausgeführten Beobachtungen darstellt.

Auch hier ist ersichtlich, dafs die Änderungen der Lichtqualität für die Kohlenfadenlampe beträchtlich gröfser als für die Glühlampe sich herausstellt. Die Nicolstellungen ändern

Tabelle 4.

Kohlenfadenlampe

Nicolstellung 220 V.	Nicolstellung 190 V.	Änderung der Nicolstellung beim Heruntergehen von 220 auf 190 V.	Verhältnis der mittl. Abweichung der abgelesenen Nicolstellung zur Änderung
36° 5′ 24″	38° 19′ 12″	2° 13′ 48″	0,167
36° 3′ 36″	38°	1° 56′ 24″	0,208
36° 6′ 36″	38° 3′ 36″	1° 57′	0,110
36° 19′ 12″	38° 4′ 12″	1° 45′	0,169
36° 19′ 12″	38° 15′ 36″	1° 56′ 24″	
36° 10′ 48″	37° 55′ 48″	1° 45′	
36° 1′ 48″	38° 25′ 48″	2° 24′	
36°	38° 5′ 24″	2° 5′ 24″	
36° 4′ 48″	38° 5′ 24″	2° 0′ 36″	
36° 3′ 36″	38° 17′ 24″	2° 13′ 48″	
36° 7′ 48″	38° 9′ 14″	2° 1′ 26″	0,164

Tabelle 5.

Nernstlampe.

Nicolstellung 220 V.	Nicolstellung 190 V.	Änderung der Nicolstellung beim Heruntergehen von 220 auf 190 V.	Verhältnis der mittl. Abweichung der abgelesenen Nicolstellung zur Änderung
25° 25′ 12″	26° 22′ 12″	0° 57′	0,251
25° 16′ 12″	26° 12′ 36″	0° 56′ 24″	0,177
25° 10′ 12″	26° 15′	1° 4′ 48″	0,217
25° 15′ 36″	26° 7′ 12″	0° 57′	0,187
25° 15′ 36″	26° 18′ 36″	1° 3′	0,263
25° 5′	26° 32′ 24″	1° 16′ 48″	0,314
25° 14′ 24″	26° 36′ 36″	1° 31′ 36″	0,204
25° 16′ 12″	26° 34′ 48″	1° 20′ 24″	0,174
25° 20′ 24″	26° 19′ 12″	1° 3′	0,280
25° 10′ 12″	26° 26′ 24″	1° 6′	0,250
25° 14′ 55″	26° 22′ 31″	1° 7′ 36″	0,2317

sich durchschnittlich in dem einen Falle um 67′, im anderen um 121 Min. Um von der quantitativen Bedeutung dieser Zahlen eine richtige Vorstellung zu erhalten, mufs man jedoch berücksichtigen, dafs es sich in dem einen und dem anderen

Falle um verschiedene Winkel handelt. Als zahlenmäfsigen Ausdruck für die Änderung der Energieverhältnisse erhalten wir in dem einen Falle den Wert

$$\frac{Tg^2\, 26^0\, 22'\, 31''}{Tg^2\, 25^0\, 14'\, 55''} = \frac{0{,}246}{0{,}222}\ (10{,}9\ \%),$$

im anderen

$$\frac{Tg^2\, 38^0\, 9'\, 14''}{Tg^2\, 36^0\, 7'\, 48''} = \frac{0{,}617}{0{,}533}\ (15{,}8\ \%).$$

Das hier zur Untersuchung herangezogene Energieverhältnis ändert sich also (durch Abschwächung der Spannung von 220 auf 190 Volt) bei der Nernstlampe um 10,9 %, bei der Kohlenfadenlampe um 15,8 %.

Ich habe endlich auch hier in allen Fällen die mittlere Abweichung der einzelnen Einstellungen ermittelt; ihr Betrag in Bruchteilen der der Spannungsänderung entsprechenden Differenz ist im letzten Stabe der Tabelle aufgeführt. Wie man sieht, beträgt hier die mittlere Abweichung etwa 23 % derjenigen Änderung, die das Licht der Nernstlampe, 16 % derjenigen, die das Licht der Kohlenfadenlampe bei Verminderung der Spannung von 220 auf 190 Volt erleidet.

Es mag gestattet sein, hier noch einige Bemerkungen über etwa in Betracht zu ziehende andere Methoden ähnlicher Art anzuschliefsen. Zunächst kann gefragt werden, ob die drei hier benutzten eine erhebliche Verfeinerung gestatten werden. Mir scheint, dafs dies höchstens für die Methode der Dämmerungswerte möglich sein dürfte. Man könnte wohl versuchen, ähnlich wie bei der Minimalfeldhelligkeit geschehen, durch Anbringung eines kleinen Prismas vor der mit homogenem Licht erleuchteten Öffnung einen Teil dieses Lichts abzulenken und somit einen Teil der Öffnung mit anderem Licht zu erleuchten. Man könnte so etwa die Mitte des Kreises mit blauem, den umgebenden Ring mit dämmerungsgleichem gelbem Licht erleuchten. Auch hier wäre dann der spektrale Abstand der beiden Lichter fixiert; die Einstellung auf Dämmerungsgleichheit hätte durch Verschiebung des Okularspaltes zu erfolgen. Bei diesem Verfahren (zu dessen Ausführung ich nicht gekommen bin) dürfte sich für die Prüfung der Lichtqualitäten wohl wegen des direkten Vergleiches zweier Lichter eine etwas gröfsere Genauigkeit erreichen lassen, als bei dem von mir benutzten. Doch dürfte der Gewinn

an Genauigkeit schwerlich ein sehr beträchtlicher sein. Bei der Rayleigh-Gleichung und bei den Minimalfeldhelligkeiten sehe ich vorderhand kein Mittel, die Genauigkeit noch zu vermehren.

Ganz anders lägen die Dinge, wenn wir im Besitze eines qualitativ fest definierten Normallichtes wären und es sich nur um die Aufgabe handelte, die Abweichungen irgend welcher anderer Lichter von ihm zu erkennen, eventuell zu messen. Von den hier in Betracht kommenden physiologischen Prüfungen ist natürlich die einfachste die direkte Beobachtung der Gesamtfärbung. Es ist im Hinblick auf die oben geschilderten Verfahrungsweisen nicht ohne Interesse, zu erfahren, wie weit die Genauigkeit dieses Verfahrens geht. Beleuchtet man einen vorderen, mit einer Öffnung versehenen Schirm mit einer, einen zweiten dahinter aufgestellten Schirm mit einer zweiten Glühlampe und variiert die Brennstärke der einen Lampe, so kann man leicht durch Wechsel der Lampenstellung die Helligkeit von Fleck und Umgebung ausgleichen und beobachten, bei welcher Differenz der Spannungen ein Farbenunterschied bemerkbar wird. Versuche dieser Art haben gelehrt, dafs bei Spannungsunterschieden von 6—8 Volt die Differenz der Farbe noch kaum bemerkbar ist; erst bei etwa 10—12 Volt ist sie mit Sicherheit wahrnehmbar, wenngleich der Grenze des Merklichen immer noch sehr nahe. Die Genauigkeit dieser Beobachtung ist also auch keine sehr beträchtliche. Ob sich darauf ein messendes Verfahren gründen läfst, ist noch fraglicher. Es würde dafür die Anwendung eines absorbierenden Körpers, am besten eine Flüssigkeit von der Beschaffenheit erforderlich sein, dafs wir durch Vorsetzung desselben in einer bestimmten Schichtdicke jedes gelblichere resp. blauere Licht einem Normallicht farbengleich machen könnten, eine Forderung der aus bekannten Gründen jedenfalls nicht ganz allgemein entsprochen werden kann; ob es für die wechselnde Brennstärke derselben Glühlampen gelingen könnte, ist wohl nicht ohne weiteres zu sagen.

Bessere Aussichten würde es bieten, wenn man von der Beobachtung der Purpurmischungen ausginge. Insbesondere würde sich leicht ermitteln lassen, wie das Mischungsverhältnis eines roten und eines blauen Lichtes bei wechselnder Brennstärke einer Lampe geändert werden mufs, um einem bestimmten gegebenen Purpurgemisch qualitativ gleich zu bleiben.

Beobachtungen dieser Art wären vielleicht insofern von besonderem praktischem Wert als sie erkennen lassen würden, wie weit innerhalb des bei physiologischen Beobachtungen hauptsächlich in Betracht kommenden Bereiches von Lichtern (etwa zwischen 670 und 460 $\mu\mu$) Änderungen der Brennstärke überhaupt als Fehlerquelle in Betracht zu ziehen sind. Leider bin ich zur Ausführung solcher Versuche nicht mehr gekommen.

Die Ergebnisse der mitgeteilten Beobachtungen fasse ich nachstehend kurz zusammen.

1. Die qualitative Zusammensetzung gemischter Lichter, insbesondere die Änderungen, die in dieser Hinsicht das Licht von Glühlampen bei wechselnder Brennstärke erleidet, können nach physiologischen Verfahrungsweisen geprüft werden, die innerhalb eines gewissen Umfanges als Ersatz einer bolometrischen Durchprüfung des Spektrums benutzt werden können.

2. Die vergleichende Prüfung des Lichtes der Kohlenfaden- und der Nernstlampe lehrt, dafs bei einer bestimmten Änderung der Spannung (Verminderung von 220 auf 190 Volt) das Licht der ersteren eine weit beträchtlichere qualitative Änderung erleidet.

3. Von den drei hier in Anwendung gezogenen physiologischen Prüfungsmethoden erreicht (so wie sie hier verwendet wurden) die der Rayleigh-Gleichung den höchsten Genauigkeitsgrad. Die mittlere Abweichung beläuft sich hier auf 23 % desjenigen Betrages der einer Veränderung des Nernstlampenlichtes durch Verminderung der Spannung von 220 auf 190 Volt entspricht. Der analoge Wert beträgt für die Methode der Minimalfeldhelligkeiten 33 und für die der Dämmerungswerte 62 %.

4. Für physiologisch-optische Versuche, bei denen Änderungen der Lichtqualität als Fehlerquelle in Betracht kommen, wird die Nernstlampe der Kohlenfadenlampe vorzuziehen sein.

(Eingegangen am 17. Mai 1907.)

(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Beitrag zur Lehre vom Farbengedächtnis.

Von

Lotte von Kries und Elisabeth Schottelius.

Mit welchem Grade der Genauigkeit wir sinnliche Eindrücke gedächtnismäfsig festzuhalten imstande sind, das ist eine Frage, die zwar für alle Sinne in prinzipiell gleichartiger Weise aufgeworfen werden kann, die sich aber doch nach den besonderen Verhältnissen der einzelnen Sinne erheblich verschieden gestaltet. Im Gebiete des Gehörsinnes legt die konventionelle Festsetzung genau (oder wenigstens sehr annähernd) bestimmter Tonhöhen vor allem die Frage nahe, ob es gelingt, die einzelnen musikalisch festgelegten Töne zu erkennen; und es hat sich wie bekannt gezeigt, dafs diese Fähigkeit (mit dem Namen des absoluten Gehörs oder des absoluten Tongedächtnisses bezeichnet) zwar nicht übermäfsig selten ist, aber doch nur einer Minderzahl von Personen zukommt. Daneben kann gefragt werden, wie weit es gelingt, ein bestimmtes Verhältnis zweier Töne im Gedächtnis festzuhalten. Hier spielen nun die musikalischen Intervalle eine derart ausgezeichnete Rolle, dafs man wiederum in erster Linie die Frage auf sie zu erstrecken gewohnt ist. Für die Festhaltung sowohl einzelner Empfindungen wie bestimmter Beziehungen zwischen zwei Empfindungen schaffen also besondere Umstände beim Gehörssinn eigenartige Bedingungen. Betrachtet man die entsprechenden Verhältnisse beim Gesichtssinn, so mufs man zunächst bemerken, dafs hier eine dem absoluten Gehör analog zu setzende Leistung jedenfalls durchgängig vorhanden ist. Der mit normalem Farbensinn Begabte wenigstens benennt unbedenklich die einzelnen gesehenen Farben als Rot oder Gelb, grünlich gelb usw., leistet also etwas, was der

Benennung gehörter Töne zu entsprechen scheint. Allein schon darin liegt doch hier ein grofser Unterschied, dafs hier nur eine sehr kleine Zahl von Namen existiert, die fest bestimmte Empfindungen zu bedeuten scheinen, wie dies namentlich von den sogen. Prinzipalfarben gilt, während zur Bezeichnung anderer eben nur die unbestimmteren Übergangsbezeichnungen (Gelbgrün usw.) zur Verfügung stehen. Andererseits kann aber natürlich auch die Farbe eines bestimmten Gegenstandes, ganz abgesehen von irgend einer sprachlichen Bezeichnung, im Gedächtnis festgehalten werden; und es kann demgemäfs denn auch die Frage aufgeworfen werden, mit welchem Genauigkeitsgrade irgend eine objektiv gegebene und dem Gedächtnis eingeprägte Farbe, ganz abgesehen von ihrer sprachlichen Bezeichnung, wiedererkannt oder eingestellt werden kann. — Allerdings kann man im voraus sagen, dafs Ermittelungen dieser Art gerade im Gebiete des Gesichtssinnes auf besondere Schwierigkeiten stofsen werden. Die eine besteht darin, dafs wir nicht gewohnt sind, Farben als Empfindungen zu beurteilen, sondern vielmehr die Farbe uns stets ein Merkmal eines Gegenstandes ist; wir sind daher gewohnt, bei der Beurteilung einer uns vorgelegten Farbe die Verhältnisse der jeweiligen Beleuchtung u. dgl. in Rechnung zu bringen, wodurch die Beurteilung der Empfindung, wie sie hier erforderlich ist, erschwert wird. Ein zweiter Punkt ist der, dafs wegen der wechselnden Stimmungen des Sehorgans ein und derselbe Lichtreiz je nach Umständen erheblich wechselnde Empfindungen auslösen kann. Da nun schliefslich alle unsere Bestimmungen auf Werte zurückgehen müssen, die Reizarten und deren Modifikationen bedeuten (z. B. Änderungen der Lichtwellenlänge), so wird zu beachten sein, dafs diese nur unter Voraussetzung einer bestimmten Stimmung auch für die Empfindung etwas Festes bedeuten würden, Änderungen der Stimmung aber event. eine unkontrollierbare Fehlerquelle darstellen könnten.

Indessen konnten doch erst die Versuche selbst lehren, welche Bedeutung diesen Schwierigkeiten etwa beizumessen ist. Da überdies Beobachtungen dieser Art unseres Wissens bis jetzt so gut wie gar nicht vorliegen, so haben wir versucht, durch eine Reihe von Versuchen hier wenigstens einen ersten Anfang zu gewinnen.

Unsere Beobachtungen zerfallen entsprechend dem vorhin

Angeführten in zwei Teile. Bei dem ersten war die Aufgabe gestellt, einfach auf Grund des unmittelbaren Empfindungseindruckes und der von vornherein gegebenen Vorstellung (z. B. von einem reinen Gelb) eine Farbe einzustellen, die der Beobachterin als reine Prinzipalfarbe erschien. Als Ergebnis kamen hier einerseits die durchschnittlich ermittelten, durch ihre Wellenlänge definierten Lichter, andererseits der Grad der Genauigkeit oder die mittleren Abweichungen in Betracht. Beim zweiten Teile dagegen wurde die Aufgabe gestellt, irgend eine willkürlich gewählte Zwischenfarbe dem Gedächtnis einzuprägen; hier richtete sich dann naturgemäſs das Interesse wenigstens in erster Linie auf die Sicherheit des Wiedererkennens. Das Verfahren, das wir benutzten, war in allen Fällen prinzipiell das gleiche. Es wurde ein geradsichtiger Spektralapparat benutzt, durch dessen Okularspalt blickend der Beobachter in bekannter Weise ein kleines Feld mit homogenem Licht erleuchtet wahrnimmt. Die Wellenlänge des homogenen Lichtes kann durch Verschiebung des Okularspaltes geändert werden, und der Beobachter ist so in die Lage gesetzt, eine Farbe gemäſs den im Einzelfalle gestellten Anforderungen einzustellen. Der Okularspalt war auf einem besonderen Apparate befestigt, an dem er mittels einer Tangentenschraube verschoben und an dem seine Stellung an einer Kreisteilung abgelesen wurde. In bekannter Weise geschah auch die Graduierung des Apparates, indem die Lagen des Spalts ermittelt wurden, bei denen einige Metallinien in seiner Mitte sichtbar wurden. (Li, Na, Tl und Sr.)

Der speziellen Darstellung unserer Beobachtungen haben wir noch einige Bemerkungen in bezug auf die Ausführung der Versuche, sowie die Berechnung derselben vorauszuschicken. Es erschien uns am richtigsten, die zu beurteilenden Farbenfelder ohne jedes Vergleichslicht im dunkeln Gesichtsfelde beobachten zu lassen. Unter diesen Umständen konnte auch auf eine neutrale Stimmung des Sehorgans gerechnet werden. Die ersten Versuche, die wir mit der Einstellung eines reinen Gelb machten, lehrten sogleich, daſs wenn wir unmittelbar nach der Verdunkelung des Raumes mit den Versuchen begannen, die erhaltenen Einstellungen in den ersten Minuten sich nicht unerheblich änderten, offenbar ein Ausdruck einer Stimmungsänderung des Sehorgans, oder wie man das Verhältnis auch ausdrücken kann, einer der Tagesbeleuchtung im allgemeinen zukommenden Eigen-

schaft das Sehorgan in gewissem Betrage chromatisch umzustimmen. Die Beobachtungen lehrten, dafs diese Umwandlung nach einigen Minuten beendigt war, und wir haben daher später die Beobachtungen immer erst nach einem Dunkelaufenthalt von 4—5 Minuten begonnen. Die Versuche wurden dann im einzelnen so ausgeführt, dafs die eine von uns 30 Einstellungen nacheinander machte, die von der anderen mit Benutzung eines kleinen Glühlämpchens abgelesen und notiert wurden. Was die Berechnung anlangt, so schien es uns unerläfslich, sie einigermafsen verwickelt zu gestalten. Zunächst war der durchschnittliche Wert aller Einstellungen einer Reihe zu ermitteln. Als Mafs für die Genauigkeit der Einstellungen wurde sodann die mittlere Abweichung aller Einstellungen vom Durchschnitt (ohne Berücksichtigung des Vorzeichens) ausgerechnet, die wir im folgenden als M. D. A. (mittlere Durchschnittsabweichung) bezeichnen. Es erschien nun aber von vornherein auch mindestens denkbar, dafs z. B. die den Einstellungen zugrunde liegende Vorstellung eines reinen Gelb im Laufe einer Versuchsreihe sich merklich modifizierte. In diesem Falle hätten die Einstellungen eine durchschnittliche Tendenz erkennen lassen, sich in einem bestimmten Sinne zu ändern. Um dies zahlenmäfsig festzulegen, haben wir in den meisten Fällen neben der mittleren Durchschnittsabweichung auch den Wert ermittelt, den man erhält, wenn man die Differenz jeder Einstellung von der unmittelbar vorhergehenden nimmt und das Mittel aller dieser Werte (wiederum ohne Berücksichtigung des Vorzeichens) ausrechnet. Wir wollen diesen Wert die mittlere Successivabweichung (M. S. A.) nennen. Sind die einzelnen Einstellungen, abgesehen von den in jedem Einzelfalle zufällig wechselnden Umständen auch noch durch dauernde Modifikationen bedingt, die sich auf eine gröfsere Zahl erstrecken, so wird sich dies darin bemerklich machen, dafs der Wert der M. S. A. kleiner ist als der der M. D. A.

Abgesehen von diesen Werten, die das Verhältnis der einer Reihe angehörigen Einzelwerte untereinander betreffen, war es zunächst in der 2. Gruppe der Versuche (Reproduktion einer willkürlich gewählten Farbe) geboten, die Beziehung zu diesem Muster zu ermitteln. In dieser Hinsicht haben wir zunächst als Reihenfehler (R. F.) die Abweichung des Reihendurchschnitts vom Muster (im 4. Stabe) eingetragen, sodann aber noch die durchschnittlichen Abweichung aller Einzelwerte

10*

vom Muster (ohne Berücksichtigung des Vorzeichens) als mittlere Normabweichung (M. N. A.) im 5. Stabe eingetragen. —

Bei den Versuchen über freie Einstellung prinzipaler Farben fehlt ja nun streng genommen ein solcher als Norm zu betrachtender Standardwert. Indessen kann man zu einer ähnlichen Betrachtung doch gelangen, wenn man die aus den Reihen sich ergebenden Werte für reines Gelb (resp. Grün) als Standardwerte zugrunde legt. Dies haben wir getan und unter Benutzung eines solchen auch für diese Versuchsreihen einen Reihenfehler (R. F.) und eine mittlere Normabweichung (M. N. A.) berechnet.[1]

In der untersten Horizontalreihe jeder Tabelle sind dann schliefslich die Gesamtmittel der betr. Werte aller untereinander gleichartigen Reihen aufgeführt.[2]

Unsere ersten Versuche über die Einstellung eines reinen Gelb enthält die folgende Zusammenstellung.

Gelb. (K.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Subj. fix. reines Gelb
6. XI. 06	4° 14′	8′	6′,5	+ 2′,9	7′,88	
6. XI. 06	4° 6′,6	5′,3	6′	— 4′,5	6′,47	
9. XI. 06	4° 14′,3	7′,09	5′,5	+ 3′,2	9′,42	
9. XI. 06	4° 9′,5	2′,55	3′,5	— 1′,6	3′,1	
Mittel	4° 11′	5′,73	5′,4	3′,1	6′,7	

Gelb. (Sch.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Subj. fix. reines Gelb
6. XI. 06	4° 6′	8′	6′,5	— 8′	9′,7	
6. XI. 06	4° 8′,5	5′,4	5′,2	— 5′,5	7′,45	
9. XI. 06	4° 19′	19′,3	7′,6	+ 5′	5′,6	
9. XI. 06	4° 22′,3	4′	3′,3	+ 8′	8′,4	
Mittel	4° 14′	9′,2	5′,6	6′,6	7′,8	

[1] Obwohl, wie sogleich zu erwähnen, die für reines Gelb und reines Grün von der einen und der anderen Beobachterin gefundenen Werte sehr nahezu übereinstimmen, schien es doch richtiger, in diesen Berechnungen unsere Beobachtungen ganz zu trennen und für jede von uns den für sie selbst sich ergebenden Wert des reinen Gelb resp. Grün als Norm der Berechnung zugrunde zu legen.

[2] Die Reihenfehler wurden hier wiederum ohne Berücksichtigung des Vorzeichens zusammengerechnet.

Als Gesamtdurchschnitt ergibt sich für die eine von uns 4° 11′, für die andere 4° 14′. Beide Zahlen stimmen so nahe überein, dafs sich für die Annahme eines individuellen Unterschiedes kein Anhalt bietet. Der Mittelwert von 4° 12′,5 entspricht einer Wellenlänge von 574,4 $\mu\mu$. Die mittleren D. A. einer Reihe betragen wie man sieht zwischen 2′,5 und 8 Minuten, wenn man von dem einen stark aus der Reihe fallenden Wert (19′,3) absieht. Die M. S. A. sind nicht erheblich geringer als die M. D. A., so dafs Änderungen im Laufe einer Reihe nicht merklich vorzukommen scheinen. Dagegen ist einigermafsen auffällig, dafs die Ergebnisse der einzelnen Reihen doch beträchtlicher auseinandergehen als man erwarten sollte, wenn alle Reihen unter genau gleichen konstanten Bedingungen stünden. Wir kommen auf diesen Punkt noch später zurück.

Die hier gemachten Einstellungen beruhten, wie erwähnt, lediglich auf der Vorstellung, die wir im voraus von einem reinen Gelb besafsen, gleichviel auf welcher Grundlage diese beruhen oder woher sie stammen mochte.

Es erschien nun von Interesse festzustellen, ob die Sicherheit dieser Einstellung durch eine systematisch darauf gerichtete Einübung noch vermehrt werden könnte.

Aus diesem Grunde sind wir mit dem in diesen ersten Versuch ermittelten Gelb (574,4 $\mu\mu$) so zu Werke gegangen wie es dann auch für willkürlich gewählte (unreine) Farben beabsichtigt war; wie haben nämlich die Farbe in besonderen Reihen, die wir Erlernungsreihen nennen wollen, einüben lassen und danach die Aufgabe gestellt, dieses eingeübte (erlernte) Gelb aus dem Gedächtnis einzustellen. Bei diesen Erlernungsreihen gingen wir so zu Werke, dafs vor jeder Einstellung die als Muster festgesetzte Farbe (im gegenwärtigen Falle also das Gelb von 574,4 $\mu\mu$) eingestellt und von der Beobachterin angesehen wurde; ebenso wurde das Ergebnis jeder Einstellung ihr mitgeteilt, so dafs sie darüber unterrichtet wurde, ob und in welchem Sinne die Einstellung fehlerhaft gewesen war. — Einigermafsen willkürlich ist es natürlich, wie lange nach einer Erlernungsreihe man wieder freie Einstellung machen lassen und so das Ergebnis der Einübung prüfen will. Wir haben, um in dieser Hinsicht einen bestimmten Ausgangspunkt zu haben, als Regel einen Zwischenraum von einem Tage genommen. Indessen nötigten mancherlei Umstände auch gelegentlich davon abzugehen; und es war uns

nicht unwillkommen auf diese Weise auch eine gewisse Vorstellung von den hier bestehenden zeitlichen Verhältnissen zu erhalten.

Gelb. (K.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	
14. XI. 06	4° 18′,1	4′,3	4′,3	+ 6′,1	6′,7	Erlernungsreihe
21. XI. 06	4° 12′,6	3′,9	6′	+ 0′,6	3′,9	
Mittel	—	4′,1	5′,1	3′,3	5′,3	

Gelb. (Sch.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	
14. XI. 06	4° 15′,5	6′,2	6′,2	+ 3′,5	5′,7	Erlernungsreihe
21. XI. 06	4° 11′,5	2′,1	3′,6	— 0′,5	2′,05	
Mittel	—	4′,3	3′,9	2′,0	3′,9	

Gelb. (K.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Freie Einstellung
16. XI. 06	4° 27′	5′,75	4′,2	+ 15′	15′,35	2 Tage nach Erlernung
22. XI. 06	4° 14′	5′,5	5′,6	+ 2′	6′,3	1 Tag nach Erlernung
23. XI. 06	4° 11′,9	6′	4′,55	— 0′,1	6′	2 Tage nach Erlernung
Mittel	—	5′,7	4′,8	5′,7	9′,22	

Gelb. (Sch.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Freie Einstellung
16. XI. 06	4° 11′,8	3′,79	3′,9	— 0′,2	3′,85	2 Tage nach Erlernung
22. XI. 06	4° 13′,5	4′,8	6′,2	+ 1′,5	5′	1 Tag nach Erlernung
23. XI. 06	4° 11′	4′,95	5′	— 1′	4′,85	2 Tage nach Erlernung
Mittel	—	4′,5	5′,0	0′,9	4′,57	

Die Beobachtungen dieser Art, die in der obigen Zusammenstellung enthalten sind, lehren, dafs die Lösung der hier gestellten Aufgabe durch die vorgenommene Einübung nicht in

merklicher Weise mehr verbessert worden ist. Die durchschnittlich eingestellten Werte differieren von dem fixierten Muster zwar meist nur wenig, in einem Falle doch aber auch um 15 Minuten; auch die Konstanz ist nicht nennenswert verbessert, denn die M. D. A. betragen nach der Einübung auch wieder etwa 4—6′. Noch beachtenswerter ist wohl, dafs auch in den Erlernungsreihen selbst, in denen die Einstellung nach dem unmittelbar zuvor gesehenen Muster erfolgte, keine gröfsere Genauigkeit erzielt wurde; denn auch hier betragen die M. D. A. 2 bis 6′. Eine Veränderung der Ergebnisse durch weitere Fortsetzung der Einübung erschien hiernach so unwahrscheinlich, dafs wir von einer weiteren Ausdehnung der Versuche in dieser Richtung abgesehen haben.

Die in ähnlicher Weise gemachten Versuche ein reines Grün einzustellen, führten zu den in den folgenden Tabellen enthaltenen Resultaten.

Grün. (K.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Subj. fix. reines Grün
7. XI. 06	10° 58′	28′	28′	41′,2	37′,48	
7. XI. 06	10° 9′,6	17′,3	16′,7	7′,2	19′,21	
13. XI. 06	10° 13′,2	10′,76	17′,9	3′,6	12′,92	
13. XI. 06	9° 46′,5	14′,8	13′	30′,3	30′,9	
Mittel	10° 17′	17′,7	18′,9	20′,6	25′,1	

Grün. (Sch.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Subj. fix. reines Grün
7. XI. 06	10° 21′	17′	19′	+ 2′,6	18′	
7. XI. 06	10° 33′,9	17′,6	21′,4	+ 15′,5	21′,36	
13. XI. 06	10° 16′	13′,9	20′,5	— 2′,4	17′,37	
13. XI. 06	10° 2′,8	14′,7	20′	— 15′,6	20′,36	
Mittel	10° 18′	15′,8	20′,2	9′,0	19′,3	

Als Durchschnittswert für die eine von uns ergibt sich 10° 17′, für die andere 10° 18′, eine Übereinstimmung, die bei der beträchtlicheren Abweichung der Einzelreihen einigermafsen zufällig genannt werden darf. Der Gesamtdurchschnitt 10° 17′,5 entspricht

einer Wellenlänge von 503,0 $\mu\mu$. Die Einstellung ist hier im Vergleich zum Gelb weniger genau; die M. D. A. bewegen sich zwischen 10 und 28 Minuten, im Durchschnitt aller Reihen betrugen sie für die eine von uns 15,8, für die andere 17,7 Minuten.

Der zweite Teil unserer Versuche sollte, wie erwähnt, die Reproduktion willkürlich gewählter und erlernter, aber nicht schon im voraus subjektiv als rein ausgezeichneter Farben betreffen. Um hier gegenüber den Prinzipalfarben einen möglichst starken Gegensatz zu gewinnen, benutzten wir eine Orange, ein Gelbgrün und ein Blaugrün die auf unserer Skala den Werten von 2°, 5° und 14′,46 entsprachen, woraus sich die Wellenlängen von 606,6, 564,6 und 473,5 $\mu\mu$ berechnen. Auch hier wurde so zu Werke gegangen, daſs wir uns die betreffenden Farben in einer oder mehreren Erlernungsreihen einzuprägen versuchten und danach dann die Einstellungen aus dem Gedächtnis gemacht wurden. In den folgenden Zusammenstellungen haben wir die Beobachtungen nicht ihrer zeitlichen Folge gemäſs aufgeführt, sondern die Erlernungsreihen von den freien Einstellungen gesondert. Naturgemäſs sind die Einübungsverhältnisse mehr oder weniger wechselnde. Um in dieser Hinsicht eine leichte Übersicht zu ermöglichen, haben wir im letzten Stabe der Tabellen jeweils eine Bemerkung angefügt, die angibt, wie lange nach der letzten Erlernungsreihe die betreffenden Versuche angestellt sind.[1]

Orange. (K.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	
14. XI. 06	1° 57′,4	10′,7	8′,8	— 2′,6	10′,2	Erlernungsreihe
21. XI. 06	2° 0′,5	6′,2	9′,9	+ 0′,5	5′,6	
27. XI. 06	2° 2′,5	4′,2	5′,4	+ 2′,5	4′,1	
27. XI. 06	2° 1′,4	3′,84	5′,6	+ 1′,4	3′,7	
Mittel	—	6′,2	8′,4	1′,75	5′,9	

[1] Freilich genügt diese Angabe streng genommen nicht um die Einübungsverhältnisse in aller Genauigkeit anzugeben, schon weil meist auch die Einübungen mehrfach wiederholt wurden. Wer die Versuche in dieser Richtung einer genaueren Durchsicht unterwerfen will, findet hierzu die Möglichkeit durch die im ersten Stabe der Tabellen überall hinzugefügten Versuchsdaten.

Orange. (Sch.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Erlernungsreihe
14. XI. 06	1° 57'	7',5	9',4	— 3'	6',5	
21. XI. 06	2° 1',5	5',6	5',2	+ 1',5	5',25	
27. XI. 06	1° 59',9	3',72	7',3	— 0',1	3',7	
27. XI. 06	1° 58',8	2',72	3',7	— 1',2	2',8	
Mittel	—	4',9	6',4	1',45	4',6	

Orange. (K.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Freie Einstellung
16. XI. 06	2° 14'	16'	14',55	+ 14'	21',1	2 Tage nach Erlernung
22. XI. 06	2° 5'	7',2	8',3	+ 5'	8',15	1 Tag nach Erlernung
23. XI. 06	1° 48',8	9',98	9',1	— 11',2	12',7	2 Tage nach Erlernung
28. XI. 06	2° 8',5	8',8	5',1	+ 8',5	10',6	1 Tag nach Erlernung
28. XI. 06	1° 57'	7',6	10',15	— 3'	7',3	1 Tag nach Erlernung
3. XII. 06	1° 50',2	8',72	8',1	— 9',8	12',9	6 Tage nach Erlernung
3. XII. 06	2° 6',6	8',92	8',4	+ 6',6	8',8	6 Tage nach Erlernung
Mittel	—	9',4	9',1	8',3	11',65	

Orange. (Sch.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Freie Einstellung
16. XI. 06	1° 47',8	10',61	5',55	— 12',2	12',75	2 Tage nach Erlernung
22. XI. 06	1° 58',5	2',7	3',7	— 1',5	2',95	1 Tag nach Erlernung
23. XI. 06	1° 51',3	12',27	7'	— 8',7	13',6	2 Tage nach Erlernung
28. XI. 06	1° 58',2	4',7	5',4	— 1',8	4',8	1 Tag nach Erlernung
28. XI. 06	1° 57',4	4',53	7',2	— 2',6	5',55	1 Tag nach Erlernung
3. XII. 06	1° 43',7	7',3	6',5	— 16',3	16',8	6 Tage nach Erlernung
3. XII. 06	1° 51',7	7',68	4',4	— 8',3	8',75	6 Tage nach Erlernung
Mittel	—	7',4	5',7	7',3	9',5	

Gelbgrün. (K.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	
8. XII. 06	4° 57',7	5',87	8',7	— 2',3	5',1	Erlernungsreihe
8. XII. 06	5°	8',6	6',8	—	8',6	
14. XII. 06	4° 57',8	4',15	7'	— 2',2	4',45	
14. XII. 06	5° 1',3	3',16	4'	+ 1',3	2',9	
20. XII. 06	5° 5',5	6'	7',55	+ 5',5	6',8	
Mittel	—	5',6	6',8	2',3	5',6	

Gelbgrün. (Sch.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	
8. XII. 06	4° 57',2	6',24	8',3	— 2',8	7',2	Erlernungsreihe
8. XII. 06	4° 57'	9',6	8'	— 3'	9',6	
14. XII. 06	5° 2',2	6',59	10',55	+ 2',2	6',6	
14. XII. 06	4° 59',9	3',36	5',1	— 0',1	3',3	
20. XII. 06	4° 59',3	6',27	8',8	— 0',7	6',2	
Mittel	—	6',4	8',1	1',8	6',6	

Gelbgrün. (K.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Freie Einstellung
10. XII. 06	4° 56'	8',6	9'	— 4'	9',7	2 Tage nach Erlernung
10. XII. 06	4° 54'	7',1	5',5	— 6'	8'	2 Tage nach Erlernung
5. XII. 06	4° 54'	9',75	9',3	— 6'	10',5	1 Tag nach Erlernung
15. XII. 06	5° 7',6	6',96	7',5	+ 7',6	8',8	1 Tag nach Erlernung
20. XII. 06	4° 59',9	7',12	10',15	— 0',1	7',1	Am gleichen Tg. d. Erlng.
21. XII. 06	5° 8'	6',1	7',6	+ 8'	8',6	1 Tag nach Erlernung
21. XII. 06	4° 59',2	6',34	6',4	— 0',8	6',15	1 Tag nach Erlernung
Mittel	—	7',4	7',9	9',6	8',4	

Gelbgrün. (Sch.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Freie Einstellung
10. XII. 06	5° 1'	8'	10',3	+ 1'	7',8	2 Tage nach Erlernung
10. XII. 06	5° 10'	9',9	11',65	+ 10'	12',5	2 Tage nach Erlernung
15. XII. 06	4° 59',6	4',37	5',65	— 0',4	4',75	1 Tag nach Erlernung
15. XII. 06	5° 3'	4',6	6',8	+ 3'	4',5	1 Tag nach Erlernung
20. XII. 06	5° 5',2	5',97	5',75	+ 5',2	6',25	Am gleichen Tg. d. Erlng.
21. XII. 06	5° 4',3	7',44	7',7	+ 4',3	7',15	1 Tag nach Erlernung
21. XII. 06	5° 1',1	4',95	8',75	+ 1',1	5',5	1 Tag nach Erlernung
Mittel	—	6',5	8',1	3',6	6',9	

Blaugrün. (K.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	
7. I. 07	14° 44',8	11',1	14',7	— 1',2	11',15	Erlernungsreihe
7. I. 07	14° 47',7	8',93	15'	+ 1',7	9',1	
10. I. 07	14° 48'	12'	17'	+ 2'	12',1	
10. I. 07	14° 48',2	10',68	15',1	+ 2',2	10',9	
Mittel	—	10',7	15',4	1',8	10',8	

Blaugrün. (Sch.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	
7. I. 07	14° 34',4	12',1	19',6	— 11',6	15',7	Erlernungsreihe
7. I. 07	14° 43',2	10',77	15',6	— 2',8	11',5	
10. I. 07	14° 43',1	11'	16',3	— 2',9	11',5	
10. I. 07	14° 48',3	11',25	17',47	+ 2',3	11',8	
Mittel	—	11',3	17',2	4',9	12',6	

Blaugrün. (K.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Freie Einstellung
8. I. 07	14° 53′	16′,4	18′,6	+ 7′	16′	1 Tag nach Erlernung
8. I. 07	14° 43′,9	13′,7	16′,1	— 2′,1	13′,5	1 Tag nach Erlernung
11. I. 07	14° 49′	12′	11′,4	+ 3′	12′,5	1 Tag nach Erlernung
11. I. 07	14° 46′,5	11′,2	9′,65	+ 0′,5	11′,6	1 Tag nach Erlernung
12. I. 07	14° 48′	11′,7	14′,8	+ 2′	11′,7	2 Tage nach Erlernung
12. I. 07	14° 53′,9	11′,4	13′,8	+ 7′,9	12′	2 Tage nach Erlernung
Mittel	—	12′,7	14′,1	3′,7	12′,9	

Blaugrün. (Sch.)

Datum	D. E.	M. D. A.	M. S. A.	R. F.	M. N. A.	Freie Einstellung
8. I. 07	14° 39′	10′,15	9′,65	— 7′	11′,45	1 Tag nach Erlernung
8. I. 07	14° 39′,4	9′,38	13′,60	— 6′,4	11′,3	1 Tag nach Erlernung
11. I. 07	14° 38′,8	8′,8	8′,35	— 7′,2	11′,9	1 Tag nach Erlernung
11. I. 07	14° 49′,6	8′,4	7′,25	+ 3′,6	8′,89	1 Tag nach Erlernung
12. I. 07	14° 42′,9	9′,25	10′,1	— 3′,1	9′,25	2 Tage nach Erlernung
12. I. 07	14° 48′	8′,35	13′,4	+ 2′	7′,9	2 Tage nach Erlernung
Mittel	—	9′,1	10′,4	4′,9	10′,1	

Eine zusammenfassende Betrachtung der obigen Ergebnisse kann in mehrerlei Weise geschehen und ist unter mancherlei Gesichtspunkten von Interesse. Beginnen wir, als mit dem Einfachsten, mit einer Vergleichung der in den Erlernungs- und der in den Gedächtnisreihen erhaltenen Ergebnisse.

Wie zu erwarten sind in den Erlernungsreihen (in denen wie erwähnt unmittelbar vor jeder Einstellung das Muster vorgezeigt wurde) die Reihenfehler (Abweichung der Durchschnittseinstellung vom Muster) nur gering; dagegen sind sie erheblich gröfser bei den Gedächtniseinstellungen. Bilden wir, um dies zu veran-

schaulichen, aus den Reihenfehlern nochmals einen Durchschnitt, einerseits für die Erlernungs-, andererseits für die Gedächtnisreihen, so finden wir folgendes [1]:

	Durchschnittliche Reihenfehler für								
	Orange			Gelbgrün			Blaugrün		
Erlernungsreihen	1',75	*1',45*	[1',6]	2',3	*1',8*	[2',1]	1',8	*4',9*	[3',3]
Gedächtnisreihen	8',3	*7',3*	[7',8]	4',6	*3',6*	[4',1]	3',7	*4',9*	[4',3]

Entsprechend finden wir nun auch die M. N. A. (mittleren Abweichungen von Muster) in den Gedächtnisreihen merklich höher als in den Erlernungsreihen, wie dies die folgende (wiederum Gesamtdurchschnitte enthaltende) Zusammenstellung erkennen läfst.

	Mittlere Musterabweichungen in								
	Orange			Gelbgrün			Blaugrün		
Erlernungsreihen	5',9	*4',6*	[5',25]	5',6	*6',6*	[6',1]	10',8	*12',6*	[11',7]
Gedächtnisreihen	11',7	*9',5*	[10',6]	8',4	*6',9*	[7',7]	12',9	*10',1*	[11',5]

Während, wie gesagt, diese Tatsache dem naturgemäfs zu erwartenden entspricht, kann es einigermafsen überraschen, dafs die M. D. A. einer Reihe sich in den Einübungs- und den Gedächtnisreihen verhältnismäfsig wenig unterscheiden. Auch dies veranschaulichen wir durch eine nochmalige Durchschnittsberechnung. Es beträgt das Mittel aller M. D. A.:

	Orange			Gelbgrün			Blaugrün		
für die Erlernungsreihen	6',2	*4',9*	[5',5]	5',6	*6',4*	[6',0]	10',7	*11',3*	[11',0]
für die Gedächtnisreihen	9',4	*7',4*	[8',4]	7',4	*6',5*	[7',0]	12',7	*9',1*	[10',9]

Man kann dieses Ergebnis etwa so ausdrücken, dafs die eine jeder Reihe zugrunde liegende und sie bestimmende Erinnerungs-

[1] In den folgenden Zusammenstellungen sind die Werte der einen Beobachterin (L. v. K.) in gewöhnlichem Druck, die der anderen (E. Sch.) kursiv gedruckt und die Mittel aus beiden in eckigen Klammern hinzugefügt.

vorstellung einer Farbe zwar im Vergleich zu der erlernten nicht ganz unerheblich abweicht, aber wenigstens für den Zeitraum einer Reihe derartig bestimmt ist, dafs die einer Reihe angehörigen Einstellungen untereinander eine sehr gute Übereinstimmung zeigen, eine so gute, dafs sie durch jedesmalige Vorweisung des Musters, wie es in den Erlernungsreihen geschah, nur unerheblich verbessert wird.

Wir wenden uns zu derjenigen Betrachtung, an die sich, wie im voraus zu erwarten war, das Hauptinteresse unserer Versuche knüpft, einer Zusammenstellung der Ergebnisse der Gedächtnisreihen mit anderen schon bekannten Leistungen im Gebiete des Gesichtssinnes. Am meisten Analogie bieten unsere Beobachtungen ohne Zweifel mit denjenigen, in denen die Aufgabe gestellt ist, ein Licht, dessen Wellenlänge vom Beobachter verändert werden kann, mit einem anderen auf gleichen Farbenton zu bringen, oder die Grenze zu ermitteln, bei der ein Unterschied mit Sicherheit wahrgenommen werden kann. Denn man kann etwa sagen, dafs es sich in diesem und in unserem Falle um die gleichen Aufgaben handelt, mit der Modifikation, dafs an die Stelle des dort objektiv gegebenen und somit auch eine Empfindung fixierenden Objektes hier ein gedächtnismäfsig festgehaltenes Erinnerungsbild getreten ist. Unter diesem Gesichtspunkt werden wir in erster Linie die von uns gefundenen M. D. A. mit den bei solchen Versuchen gefundenen mittleren Fehlern in Vergleich bringen dürfen. Die mittleren Fehler, die bei der Einstellung eines Feldes auf gleichem Farbenton mit einem anderen gemacht werden, sind in einwandsfreier Weise von König[1] bestimmt worden. Sie stehen, wie bekannt, in naher Beziehung zu denjenigen Änderungen, die einen eben bemerkbaren Unterschied ergeben, so zwar, das nach der Fehlertheorie für diese eben merklichen Unterschiede etwa der 1,8fache Wert der mittleren Fehler zu erwarten ist. Diejenigen Differenzen der Wellenlängen die einen eben merklichen Unterschied des Farbentones ergeben, sind in entsprechender Weise von Uhthoff[2] ermittelt worden.

Wir haben nun für die von uns benutzten Lichter die mittleren Fehler aus der Tabelle Königs, die eben merklichen Unter-

---

[1] Mitgeteilt bei Brodhun, *diese Zeitschrift* 3, S. 105.

[2] *Ebenda*, S. 106.

schiede aus derjenigen von Uhthoff interpoliert und mit unseren M. D. A. nachstehend zusammengestellt, wobei wir unsere, zunächst in Bogenminuten der benutzten Teilung ausgedrückten Werte nach Maſsgabe der Dispersionsverhältnisse in Wellenlängen umgerechnet, übrigens die Werte der beiden Beobachterinnen in einen Mittelwert zusammengezogen haben.[1]

	Orange (606,6 μμ)	Gelb (574,5 μμ)	Gelbgrün (564,6 μμ)	Grün (503,2 μμ)	Blaugrün (473,5 μμ)
Unsere M. D. A.	2,27 μμ	1,34 μμ	1,33 μμ	2,02 μμ	1,09 μμ
Mittlere Fehler (König)	0,51 μμ	0,45 μμ	0,55 μμ	0,43 μμ	0,57 μμ
Eben merkliche Unterschiede (Uhthoff)	1,06 μμ	1,01 μμ	1,28 μμ	1,09 μμ	1,36 μμ

Man sieht, daſs unsere M. D. A., wie ja selbstverständlich, gröſser als die von König gefundenen mittleren Fehler, aber doch von derselben Gröſsenordnung sind. Sie belaufen sich auf etwa das zwei- bis fünffache von jenen. Und sie betragen durchschnittlich etwa das 1,5fache der eben merklichen Unterschiede.

Bekanntlich haben die hier erwähnten Beobachtungen Königs und Uhthoffs (sowie übrigens auch schon ältere) gelehrt, daſs die Genauigkeit der Vergleichung (nach Wellenlängen gerechnet) an zwei Stellen des Spektrums, im Gelb und im Blaugrün ein Maximum zeigt. Es ist nicht ohne Interesse zu bemerken, daſs trotz der erheblichen Schwankungen in dem Verhältnis unserer M. D. A. zu den mittleren Fehlern und zu den eben merklichen Unterschieden und trotz der kleinen Zahl von Punkten des Spektrums, auf die unsere Beobachtungen sich beziehen, dieser Umstand auch hier deutlich zum Ausdruck kommt.

Die hiermit gefundene Bewertung des optischen Gedächtnisses läſst die Leistung desselben als eine überraschend weitgehende erscheinen. Denn es zeigt sich (so etwa kann man den Sachverhalt ausdrücken), daſs die Schwankungen und Unsicherheiten des Erinnerungsbildes zwar etwas aber doch nicht gerade sehr viel mehr ins Gewicht fallen als die auch für die Vergleichung zweier gegebener Empfindungen gesteckten Genauigkeitsgrenzen. Weiter erscheint uns bemerkenswert, daſs sich in

[1] Eine Bogenminute der Teilung entsprach bei dem benutzten Orange 0,27, im Gelb 0,21, Gelbgrün 0,20, Grün 0,12 und Blaugrün 0,10 μμ.

dieser Hinsicht eine Bevorzugung der sog. reinen Farben nicht konstatieren läſst. Die Gedächtniseinstellungen erscheinen relativ am ungenauesten im reinen Grün, wo die M. D. A. auf den doppelten Betrag des ebenmerklichen Unterschiedes steigt; dagegen erscheint sie am genauesten im Blaugrün, wo die M. D. A. hinter diesem Wert sogar etwas zurückbleibt, ein einigermaſsen überraschendes Ergebnis, da wir bei den Einstellungen im Blaugrün ein vorzugsweise hohes subjektives Gefühl der Unsicherheit gehabt hatten.

Wie oben schon angedeutet, erschien es nun wünschenswert, die erhaltenen Resultate noch in anderer Richtung zu vergleichen. In der Tat lassen die hier zunächst als Maſs für die Sicherheit der Erinnerung benutzten mittleren Durchschnittsabweichungen zwar den Genauigkeitsgrad erkennen, mit dem eine jeweils vorhandene Erinnerungsvorstellung sich in einer Reihe aufeinanderfolgender Einstellungen geltend macht. Dabei kommt aber die Richtigkeit oder Unrichtigkeit dieser Erinnerungsvorstellung selbst nicht zur Geltung; vielmehr bleibt unbeachtet, wie weit sie sich von dem erlernten Muster unterscheidet. Um einen Vergleich auch in dieser Richtung zu ermöglichen, kann man die mittleren Normabweichungen zusammenstellen, wobei man dann für die Prinzipalfarben in der oben erwähnten Weise ein Ergebnis der Einstellungen selbst, nämlich den Mittelwert aller Reihen zugrunde legen müſste. Dies ist in dem folgenden Täfelchen geschehen, in dem überdies zum Vergleich unsere

	Orange	Gelb	Grüngelb	Grün	Blaugrün
M. N. A. d. Gedächtnisreihen	2,8 $\mu\mu$	1,5 $\mu\mu$	1,5 $\mu\mu$	2,7 $\mu\mu$	1,15 $\mu\mu$
M. D. A.	2,27 $\mu\mu$	1,34 $\mu\mu$	1,33 $\mu\mu$	2,02 $\mu\mu$	1,09 $\mu\mu$
M. F. (nach König)	0,51 $\mu\mu$	0,45 $\mu\mu$	0,55 $\mu\mu$	0,43 $\mu\mu$	0,57 $\mu\mu$

mittleren Durchschnittsabweichungen und die von König gefundenen mittleren Fehler hinzugefügt sind. Wie man sieht, sind im ganzen die mittleren Abweichungen vom Muster zwar etwas, aber doch nur wenig höher als die Abweichungen der Einzelwerte vom Reihendurchschnitt. Nicht nur die Konstanz des Erinnerungsbildes oder die Präzision, mit der es sich geltend macht, sondern auch seine Übereinstimmung mit dem

Muster, aus dem es gebildet worden ist, erweist sich als eine beträchtliche. Es zeigt sich weiter, was wohl einigermaßsen überraschend genannt werden darf, daſs die verhältnismäſsig doch sehr kurzen Einübungen irgend einer willkürlich gewählten Farbe genügen, um Gedächtnisbilder zu geben, die, wenn wir die bei direkter Vergleichung bestehenden Verhältnisse als Maſs zugrunde legen, an Genauigkeit und Sicherheit hinter den Vorstellungen der reinen Farben nicht zurückbleiben.

Knüpfen wir endlich noch einige Bemerkungen an die Betrachtung der Erlernungsreihen für sich. Auch sie können wir in ähnlicher Weise, wie die Gedächtniseinstellungen mit den älteren Beobachtungen in Vergleich bringen. Da jedoch bei ihnen, wie erinnerlich, das Muster jedesmal unmittelbar vor der Einstellung gezeigt wurde, so ist es hier das ganz frische Erinnerungsbild einer unmittelbar zuvor gesehenen Farbe, was an die Stelle des sichtbaren Vergleichsfeldes getreten ist. Eine Zusammenstellung der M. N. A. in den Erlernungsreihen mit den von König gefundenen mittleren Fehlern geben wir nachstehend:

	Orange	Gelb	Gelbgrün	Blaugrün
Mittlere Musterabweichung in den Erlernungsreihen	[1,4 $\mu\mu$]	[0,97 $\mu\mu$]	[1,22 $\mu\mu$]	[1,17 $\mu\mu$]
Mittlere Fehler nach König	0,51 $\mu\mu$	0,45 $\mu\mu$	0,55 $\mu\mu$	0,57 $\mu\mu$

Man sieht, daſs sich hier unsere M. N. A. überall auf etwas mehr als das Doppelte der von König gefundenen mittleren Fehler belaufen. Die Leistung des optischen Gedächtnisses erscheint also hier, wo es sich um die Reproduktion eines ganz kurz zuvor gesehenen Musters handelt, noch erheblich besser als in den Reihen mit groſsen zeitlichen Zwischenräumen zwischen Erlernung und Einstellungen. Sie scheint überdies für alle untersuchten Farben annähernd gleich zu sein; eine Bevorzugung der reinen Farbe (Erlernungsreihen haben wir nur für Gelb ausgeführt) ist nicht bemerkbar.

Aus dem Physiologischen Institut zu Freiburg i. Br.

Über die zur Erregung des Sehorgans in der Fovea erforderlichen Energiemengen.

Von

Dr. F. P. Boswell,

Volontärassistenten am physiologischen Institut zu Berlin.

Im Anschlufs an die kürzlich an dieser Stelle mitgeteilten Beobachtungen von Eyster[1] habe ich mir in den folgenden Versuchen die Aufgabe gestellt, die Energiemengen zu bestimmen, die zu einer Erregung des Sehorgans in der Fovea erforderlich sind.

Die Versuchseinrichtung war teilweise die nämliche, die Eyster benutzt hatte. Auch ich beobachtete die Schwellenwerte für die Sichtbarkeit kleiner Öffnungen, die an einem geradsichtigen Spektralapparat angebracht in bekannter Weise mit homogenem Licht erleuchtet wurden. Auch in meinen Versuchen befand sich der Okularspalt in einem Abstande von 1,475 m von den Diaphragmen und konnte, zur Benutzung verschiedener Lichter, auf einem mit Kreisteilung und Nonius versehenen Bogen seitlich verschoben werden. Dagegen ergaben sich einige Änderungen aus dem Umstande, dafs für die Erregung der Fovea voraussichtlich gröfsere Energie- und auch gröfsere Lichtmengen zur Verwendung kommen mufsten. Es wurde hierdurch untunlich eine von der Lichtquelle bestrahlte Magnesiumoxydfläche zur Erleuchtung des Spektroskops zu benutzen. Da andererseits auf die Amylacetatlampe jedenfalls rekurriert werden mufste (wegen der für diese vorliegenden Ångströmschen Energiebestimmungen) und es natürlich unmög-

[1] v. Kries: Über die zur Erregung des Sehorgans erforderlichen Energiemengen. *Zeitschr. f. Sinnesphysiol.* **41**, S. 373.

lich ist aus der ganzen leuchtenden Fläche der Lampe durch eine Spaltvorrichtung bestimmte Bruchteile auszuschneiden, so ergab sich die Notwendigkeit, die ganze Lampe, unter Vermeidung eines Objektivspaltes, ihr Licht in das Spektroskop schicken zu lassen. Dies erschien auch angängig; nur mufste, um die erforderliche Reinheit der homogenen Lichter zu erhalten, die Lampe in sehr grofsem Abstand (8,422 m) vom Spektralapparat gebracht werden. Der Verzicht auf den Objektivspalt ergab dann weiter die Notwendigkeit, für die Abstufung der Lichtstärken auf ein anderes Verfahren zu rekurrieren. Hierfür ergab sich als einfachstes die Benutzung eines in seiner Weite veränderlichen Okularspaltes. Es wurde also als solcher eben der von seiner ursprünglichen Stelle entfernte Spalt des Spektroskops benutzt, der bilateral symmetrische Bewegung hatte und dessen Weite an einer Trommel in hundertstel Millimeter abzulesen war. — Die für meine Versuche ebenso wie für die von Eyster erforderlichen kurzen Expositionszeiten erzielte ich in der gleichen Weise durch eine vor dem Spektroskop aufgestellte Scheibe mit einem auf beliebige Breite einzustellenden Ausschnitt, deren Drehung durch einen Elektromotor mit Zentrifugalregulierung besorgt wurde. Für die Wahl der Lichtart war hier kein so sicherer Anhalt gegeben, wie in den Versuchen Eysters. Nach den Angaben Königs über das Verhältnis von Helligkeit und Energiewert bei hohen Lichtstärken schien es wahrscheinlich, dafs innerhalb eines erheblichen Bereiches von Wellenlängen, vom Natrium ab blauwärts, etwa ähnliche Werte erhalten werden würden. Ich habe mich daraufhin für das langwelligste Licht dieses Bereiches, nämlich Natriumlicht, entschieden, und zwar mit Rücksicht auf die sogleich noch zu erwähnenden Fixationsschwierigkeiten. Denn es versteht sich, dafs diese um so gröfser werden mufsten, je gröfser die parazentrale Helligkeit der benutzten Lichter im Vergleich zur fovealen wurde. In einer zweiten Reihe von Versuchen habe ich dann auch andere Lichter herangezogen, hierbei aber mich auf die Dauerexposition beschränkt.[1]

---

[1] Obwohl, wie wir sehen werden, diese Versuche die Vermutung nahe legten, dafs auch für kurze Expositionszeiten bei Benutzung grüner Lichter noch etwas kleinere Energiewerte als für Na-Licht gefunden werden könnten, habe ich doch Bedenken getragen diese Versuche mit Lichtern von geringerer Wellenlänge und demgemäfs hoher parazentraler Helligkeit zu

In bezug auf die Ausführung der Versuche ist dann noch einiges Weitere zu bemerken. Ich verfuhr stets so, dafs ich einerseits bei allmählicher Verminderung der Spaltbreite den Punkt des Verschwindens, andererseits bei Vermehrung den Punkt für das Wieder-Sichtbarwerden des zu beobachtenden Feldes ermittelte. Es wurden immer je 10 Versuche der einen und 10 der anderen Art abwechselnd gemacht. In den Tabellen sind im Stabe 3 und 4 die Mittel dieser 10 Beobachtungen eingetragen.

Eine besondere Schwierigkeit war für meine Versuche (wie ich mir im voraus sagen mufste) in der Anforderung fovealer Beobachtung gegeben. Schon bei dauernd vorhandenen Objekten ist es bekanntlich nicht leicht, sich von ihrer fovealen Sichtbarkeit resp. Unsichtbarkeit zu überzeugen. Bei nur intermittierend dargebotenen ist dies natürlich noch schwieriger. Man mufs, wenn man ein noch sichtbares Objekt durch Abschwächung zum Verschwinden bringen will, die Fixation auch in den Zwischenzeiten der Exposition festhalten. Ebenso ist, wenn ein noch nicht sichtbares durch Verstärken zur Sichtbarkeit gebracht werden soll, ein vielmaliges Probieren erforderlich. Überdies dürfen, um Summationen zu vermeiden, die zeitlichen Abstände der einzelnen Expositionen nicht zu klein gemacht werden, wodurch diese Schwierigkeit sich noch vermehrt. Unerläfslich ist die Benutzung einer in geringer Entfernung von dem eigentlichen Beobachtungsobjekt angebrachten immer sichtbaren Marke. Trotz dieser Hilfsmittel und trotz gröfster Sorgfalt in der Ausführung sind mir zuweilen Zweifel gekommen, ob die Anforderung fovealer Fixation wirklich vollkommen erfüllt worden ist. Es scheint indessen, wie wir sehen werden, dafs die Ergebnisse selbst hierfür eine gewisse Gewähr bieten.

Die Beobachtungen wurden im Zustande geringer Dunkeladaptation gemacht. Ich konnte nichts entdecken, was darauf hinwies, dafs die zunehmende Dunkeladaptation während der Dauer einer Beobachtungsreihe einen wahrnehmbaren Einflufs auf die Resultate hatte.

Die Resultate meiner ersten Beobachtungsreihen enthält die folgende ohne weitere Erläuterung verständliche Tabelle I, in

---

wiederholen, weil es mir zweifelhaft erschien, ob unter den hier bestehenden, die foveale Beobachtung noch erschwerenden Bedingungen zuverlässige Ergebnisse zu erhalten sein würden.

der übrigens (in den letzten Horizontalreihen) auch zugleich Versuche aufgenommen sind, die zum Zwecke eines Vergleiches mit Dauerexposition ausgeführt wurden.

Tabelle I.

Natriumlicht.

Expositions-zeit Θ Sek.	Durchmesser des Feldes D mm	Eingestellte Spaltweiten für Verschwinden des Objektes	Eingestellte Spaltweiten für Sichtbarkeit des Objektes	Mittel M	Produkt $\left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot \Theta \cdot M$ P	
0,01	0,987	22,7	28,5	25,6	P_1	0,1971
”	0,75	27,7	29,7	28,7	P_2	0,1263
”	0,618	31,4	38,3	34,8	P_3	0,1044
”	0,375	67,6	78,6	73,1	P_4	0,08114
0,0066	0,987	25,5	33,9	29,4	P_5	0,1523
”	0,75	32,5	45,3	39,1	P_6	0,1146
”	0,618	41,8	62,3	50,3	P_7	0,1006
”	0,375	84,6	117,0	110,6	P_8	0,08176
0,005	0,987	24,5	29,7	27,1	P_9	0,1043
”	0,75	35,5	37,8	36,6	P_{10}	0,0805
”	0,618	41,8	53,1	47,5	P_{11}	0,07118
”	0,375	84,6	99,0	91,8	P_{12}	0,05095
0,0033	0,987	34,0	50,8	42,4	P_{13}	0,1078
”	0,75	41,8	62,5	52,1	P_{14}	0,07634
”	0,618	60,4	77,5	68,9	P_{15}	0,06893
”	0,375	140,7	71,9	156,3	P_{16}	0,05777
0,0022	0,987	45,0	51,7	48,3	P_{17}	0,08265
”	0,75	67,9	76,4	72,1	P_{18}	0,06979
”	0,618	117,6	134,7	126,1	P_{19}	0,08398
Dauerexpos.	0,987	4,7	8,5	6,6	P_{20}	5,062
	0,375	8,4	16,5	12,5	P_{21}	1,382
	0,283	14,1	20,6	17,35	P_{22}	1,093

Eine zweite Reihe von Versuchen wurde, wie oben bereits erwähnt, mit anderen Lichtern ausgeführt. Da es mir hier wesentlich um einen Vergleich dieser mit dem Natriumlicht zu tun war, überdies auch die relativ schwächer wirkenden anderen Lichter mit kurzen Expositionszeiten bei den hier benutzten

Einrichtungen teilweise überhaupt nicht sichtbar zu machen waren, so habe ich mich in dieser Versuchsreihe auf die Dauerexposition beschränkt. Es kamen aufser dem Natriumlicht noch drei andere zur Verwendung: Li (670 $\mu\mu$), Tl (535 $\mu\mu$) und ein grünliches Blau von der Wellenlänge 476 $\mu\mu$.

Die Resultate dieser Versuche sind in der Tabelle II zusammengestellt.

Tabelle II.

Dauerexposition.

Wellenlänge $\mu\mu$	Durchmesser des Feldes D mm	Eingestellte Spaltweiten f. Verschwinden	Eingestellte Spaltweiten für Sichtbarkeit	Mittel M	Produkt P $\left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot M$	
670	0,987	10,6	15,1	12,8	P_1	9,8176
590	„	4,8	8,4	6,1	P_2	4,6787
535	„	8,6	15,4	12,0	P_3	9,204
476	„	47,6	72,0	59,8	P_4	45,866
670	0,75	12,3	18,7	15,5	P_5	6,820
590	„	5,9	11,0	8,45	P_6	3,718
535	„	11,8	16,1	13,95	P_7	6,138
476	„	72,3	89,9	81,1	P_8	35,684
670	0,618	14,4	20,1	17,2	P_9	5,16
590	„	8,0	13,2	10,6	P_{10}	3,18
535	„	12,7	21,4	17,05	P_{11}	5,10
476	„	112,9	135,4	124,1	P_{12}	37,2
670	0,375	33,3	23,5	26,4	P_{13}	2,930
590	„	11,9	19,0	15,4	P_{14}	1,709
535	„	20,1	30,7	25,4	P_{15}	2,820
476	„	—	—	—	—	—
670	0,252	—	—	—	—	—
590	„	13,3	20,7	17,0	P_{16}	1,075
535	„	24,8	35,9	30,4	P_{17}	1,915
476	„	—	—	—	—	—

Die Berechnung der Energiewerte gestaltet sich hier erheblich einfacher als in den Eysterschen Versuchen, da die Einschaltung einer das Licht zerstreuenden Fläche, die dort

erforderlich war, hier fortgefallen ist. Sehen wir auch hier zunächst von der prismatischen Zerlegung des Lichtes ab und nehmen an, dafs (wie es etwa bei Entfernung des Prismas sein würde) ein alles Licht enthaltendes reelles Bild der Lampe in den Okularspalt und in die Pupille fiele,[1] so würde die Gesamtenergie der sichtbaren Strahlung, die ins Auge gelangt, erhalten werden, wenn wir den von Angström angegebenen Wert E ($20{,}6 \cdot 10^{-8}$ cal. p. Sek.) multiplizieren mit dem Quotienten der in beiden Fällen von der Strahlung erfüllten körperlichen Winkel. Nun bezieht sich die Angströmsche Zahl auf die Fläche von einem Quadratzentimeter in 1 m Abstand. In unserem Falle entspricht der körperliche Winkel der Gröfse des benutzten Diaphragmas auf einen Abstand von 1,425 m (Entfernung des Diaphragmas vom Okularspalt) multipliziert mit $\frac{1}{a^2}$ wenn a das Verhältnis bedeutet, in dem die Lampe selbst zu ihrem in der Ebene des Okularspaltes entworfenen reellen Bilde steht. Dieses Verhältnis bestimmte ich auf 4,44.

So ergibt sich denn als Wert der ganzen sichtbaren Strahlung p. Sek.

$$\frac{E \cdot O \cdot 10^{-2}}{1{,}475^2 \cdot 4{,}44^2}$$

wenn O die Gröfse des Diaphragmas in qmm angibt.

Wenden wir uns nunmehr zur Berücksichtigung der spektralen Zerlegung. Nach den auch für die Versuche von Eyster zugrunde gelegten Bestimmungen Angströms beträgt diejenige Energie, die (auf einen Quadratzentimeter in 1 m Abstand) in der Form einer Strahlung zwischen λ und $\lambda + d\lambda$ gesandt wird, $0{,}0160\, \lambda^{-5} e^{-\frac{7{,}85}{\lambda}} d\lambda$. Dieser Wert berechnet sich für die in meinen Versuchen benutzten Lichtarten

Li $9{,}55 \cdot 10^{-7}\, d\lambda$
Na $3{,}78 \cdot 10^{-7}\, d\lambda$
Tl $1{,}54 \cdot 10^{-7}\, d\lambda$
476 $\mu\mu$ $0{,}447 \cdot 10^{-7}\, d\lambda$

Grammkalorien p. Sek., wo $d\lambda$ in μ angegeben ist.

---

[1] Bei den in meinen Versuchsanordnungen gegebenen Abbildungsverhältnissen erhielt das reelle Bild der Flamme eine solche Gröfse, dafs auch seine Höhe noch hinter dem Durchmesser der Pupille zurückblieb und somit, bei richtiger Stellung des Auges, das gesamte den Okularspalt passierende Licht auch in das Auge des Beobachters gelangte

Was nun die Bereiche der Wellenlänge angeht, so bestimmen sich diese ja durch die Weite des Okularspaltes. Um sie, wie hier erforderlich in Wellenlängen anzugeben, konnte davon ausgegangen werden, dafs 100 Teilstriche des Okularspalts genau 14 Minuten auf der den Okularspalt tragenden und zur Feststellung der Lichter benutzten Kreisteilung entsprachen. Unter Berücksichtigung der Dispersionsverhältnisse berechnete sich so für 100 Teilstriche des Okularspaltes

bei Li 2,56 $\mu\mu$
bei Na 2,30 $\mu\mu$
bei Tl 1,60 $\mu\mu$
bei 476 $\mu\mu$ 1,05 $\mu\mu$,

oder für einen Teilstrich

bei Li $= 2{,}56 \cdot 10^{-5}\,\mu$
bei Na $= 2{,}30 \cdot 10^{-5}\,\mu$
bei Tl $= 1{,}60 \cdot 10^{-5}\,\mu$
bei 476 $\mu\mu = 1{,}05 \cdot 10^{-5}\,\mu$.

Hiernach wird in der obigen Formel statt E ein Wert $c \cdot S \cdot 10^{-12}$ zu setzen sein, wo S die Werte des Okularspalts (in den Teilstrichen der Trommel) bedeutet, c aber einen Koeffizienten, der

für Li $= 9{,}55 \cdot 2{,}56$
für Na $= 3{,}78 \cdot 2{,}30$
für Tl $= 1{,}54 \cdot 1{,}60$
für 476 $\mu\mu = 0{,}447 \cdot 1{,}05$

zu nehmen wäre.

Um die Formel vollständig zu machen, hätten wir noch die Schwächung des Lichtes in den optischen Apparaten zu berücksichtigen, was wir durch Hinzufügung eines Koeffizienten ε tun, den wir nach den Eysterschen Bestimmungen mit 0,548 in Rechnung bringen; ferner wäre die Dauer der Einwirkung in Sekunden hinzuzufügen, da die Bestimmungen Angströms, die in der Sekunde ausgesandten Energiemengen bedeuten. Wir erhalten so schliefslich die Formel:

$$\frac{\vartheta \cdot \varepsilon \cdot O \cdot S \cdot c \cdot 10^{-14}}{1.475^2 \cdot 4{,}44^2}$$

wo, um die Bedeutung zu rekapitulieren,

ϑ die Expositionszeit in Sekunden,

ε die Lichtschwächung in den optischen Apparaten durch Absorption und Reflexionen (0,548),

O die Gröfse des Diaphragmas in qmm,

S die Weite des Okularspaltes in Trommelteilstrichen,

endlich c die oben erwähnten Koeffizienten (für Lithium 9,55 · 2,56, für Natrium 3,78 · 2,30 usw.) bedeutet.

Da in den obigen Tabellen im letzten Stabe die Produkte $\vartheta \cdot O \cdot S$ enthalten sind, so hätten wir diese, um die jedesmal ins Auge gelangenden Energiemengen zu erhalten, mit einem Faktor zu multiplizieren, der sich für Na-Licht auf

$$0{,}548 \cdot \frac{3{,}78 \cdot 2{,}3}{1{,}475^2 \cdot 4{,}44^2} \cdot 10^{-14}$$

beläuft, während er für Lithiumlicht $0{,}548 \cdot \frac{9{,}55 \cdot 2{,}56}{1{,}475^2 \cdot 4{,}44^2} \cdot 10^{-14}$, für Tl $0{,}548 \cdot \frac{1{,}54 \cdot 1{,}60}{1{,}475^2 \cdot 4{,}44^2} \cdot 10^{-14}$ und für das grünlichblaue Licht von 574 $\mu\mu$ $0{,}548 \cdot \frac{0{,}447 \cdot 1{,}05}{1{,}475^2 \cdot 4{,}44^2} \cdot 10^{-14}$ betragen würde.

Wir müssen, ehe wir auf Grund dieser Formeln zu einer Berechnung der Versuchsergebnisse schreiten, noch eines Punktes gedenken, der auch in der eingangs erwähnten Arbeit ausführlich berücksichtigt ist. Wie dort dargelegt, ist es nach den bisher gemachten Angaben, sowie auch aus theoretischen Gründen, wahrscheinlich, dafs die erforderlichen zur Erregung dienenden Energiemengen sich mit Expositionszeit und Feldgröfse zwar ändern, jedoch einen konstanten Wert erreichen, sobald diese beiden Bestimmungen unterhalb gewisser Minimalwerte bleiben, eine Erwartung, die sich in jenen Versuchen auch bestätigt findet.

Die Kompensation einer Verminderung von Expositionsdauer oder Feldgröfse durch eine Intensitätsvermehrung von gleichem Betrage (ein Proportionalitätsgesetz) hat sich dort in der Tat durch die Versuche bestätigt. Und zwar haben sich die Grenzen, bis zu denen es gilt, auf etwa 0,25 Sek. hinsichtlich der Zeit, 2 Bogenminuten hinsichtlich der Feldgröfse ergeben.

Prüft man unsere Ergebnisse unter diesem Gesichtspunkt, so zeigt sich, dafs die Energiemengen jedenfalls mit abnehmender Feldgröfse bis zu den kleinsten benutzten Werten sinken, wenn auch zuletzt nicht mehr erheblich. Es ist daher geboten, für

die Berechnung der minimalen Energiemengen diejenigen Werte zu benutzen, die sich auf die kleinsten Felder beziehen; und es kann wenigstens nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dafs durch noch weitere Verminderung (die auf technische Schwierigkeiten stiefs) die Energiemengen auf noch etwas niedrigere Werte hätten gebracht werden können. — Bezüglich der Expositionszeiten sind die Ergebnisse in dieser Richtung nicht ganz deutlich. Für die gröfsten Felder scheint es, als ob trotz der hier überhaupt nur verwendeten sehr kurzen Dauern eine Verminderung der Energiewerte noch heraustritt, wenn die Zeiten unter 0,01 Sek. sinken. Indessen bestätigt sich dies für die kleineren Felder nicht deutlich. Da es also zum mindesten zweifelhaft ist, ob wirklich mit Verminderung der Expositionszeit unter 0,01 Sek. die Energiemengen noch abnehmen, so erscheint es am richtigsten für die Berechnung der Energiemengen zunächst das Mittel aller mit dem kleinsten Felde gemachten Beobachtungen heranzuziehen. Das Mittel dieser (in der Tabelle I mit P_4, P_8, P_{12} und P_{16}) bezeichneten Werte berechnet sich auf 0,068 und wir erhalten hieraus unter Benutzung der oben entwickelten Formel $75{,}4 \cdot 10^{-18}$ Grammkalorien oder $31{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg.

Der kleinste überhaupt erhaltene Wert (P_{12}) beträgt 0,5095, woraus sich $56{,}6 \cdot 10^{-18}$ Grammkalorien oder $23{,}7 \cdot 10^{-10}$ Erg. berechnen.

Vergleicht man diese Ergebnisse mit den von Eyster erhaltenen Zahlen ($1{,}3$—$2{,}6 \cdot 10^{-10}$ Erg.), so ist der Unterschied ein nicht gerade sehr grofs zu nennender; und ich gestehe, dafs ich von dieser Tatsache zuerst einigermafsen überrascht war. Bei der gewaltigen Überlegenheit der dunkeladaptierten peripheren Teile über die Fovea mit Bezug auf die Wahrnehmung schwacher Lichter hatte man erwarten können, für eine foveale Erregung sehr viel gröfsere Energiemengen erforderlich zu finden. Indessen werden die Tatsachen doch verständlich und gewinnen dann für die ganze Einrichtung unseres Sehorgans auch wieder ein besonderes Interesse, wenn man die zeitlichen und räumlichen Verhältnisse genauer in Rücksicht zieht. Jene Überlegenheit tritt uns ja in bekannter Weise entgegen bei der Beobachtung dauernd exponierter gröfserer Objekte. Und offenbar wird hierdurch die Wahrnehmbarkeit für die peripheren (dunkeladaptierten) Teile in weit höherem Mafse begünstigt als für die Fovea. In gewissem Umfange tritt dies in den Versuchsergebnissen auch

direkt zutage, so namentlich, wenn wir die minimalen Energiemengen für kurze Expositionszeiten mit den Bedingungen der Dauersichtbarkeit vergleichen. In den Versuchen Eysters genügt es für die Sichtbarkeit bei Dauerexposition, wenn in der Sekunde etwa der 2,5fache Betrag der bei einmaliger kurzer Exposition erforderlichen zugeführt wird. Hier ist, wie Tabelle I erkennen läfst, etwa die 16—20fache Menge der für kürzeste Expositionszeit bestimmten Energiemenge als Zuführung pro Sekunde erforderlich. Für die dunkeladaptierte Peripherie wissen wir ferner namentlich aus den Beobachtungen von Piper, bis zu wie grofsen Beträgen Vermehrung der Feldgröfse eine Herabsetzung der Erleuchtungshelligkeit gestattet. Für die Fovea ergeben meine Versuche keine ganz genügende Beurteilung dieser Verhältnisse. Indessen sieht man doch, dafs schon die Vermehrung der Feldgröfse von 0,75 auf 0,987 mm nur noch eine geringe Verminderung der Helligkeit gestattet und wir uns daher hier vermutlich schon dem Punkte nähern, wo die Energiemengen den Feldgröfsen proportional wachsen. Es wird daher wohl gerechtfertigt sein zu sagen, dafs die überwiegende Fähigkeit der dunkeladaptierten Peripherie zur Wahrnehmung lichtschwacher Objekte im Vergleich mit der Fovea zwar zum Teil sich darin kundgibt, dafs kleinere Energiemengen zu einer merklichen Erregung genügen, zu einem sehr erheblichen Teil aber auch darauf beruht, dafs bei ihr die zeitliche und räumliche Summierung eine weit gröfsere Rolle spielt. Erwägt man, dafs eine solche Summierung selbstverständlich immer zugleich eine Einbufse an räumlicher und zeitlicher Unterscheidungsfähigkeit bedeutet, so wird man in der Entwicklung der Leistungen des Sehorgans hier nach der einen, dort nach der anderen Seite eine interessante und unter dem Gesichtspunkt der Zweckmäfsigkeit nicht unverständliche Funktionsteilung erblicken dürfen.

Die meiner zweiten Versuchsreihe angehörigen und in Tabelle II enthaltenen Ergebnisse gestatten eine Vergleichung derjenigen Energien, die in den übereinstimmend an der Grenze der Sichtbarkeit stehenden Lichtern verschiedener Wellenlänge enthalten sind, allerdings nur für den Fall der Dauerexposition.

Ob also die hier gefundene Abhängigkeit der Energieausnutzung von der Wellenlänge auch für minimale Expositionszeiten gilt, mag dahingestellt bleiben. Auch konnten die Be-

obachtungen nicht für alle Feldgröfsen ganz durchgeführt werden, weil teilweise die Felder bei den zulässigen Spaltweiten überhaupt nicht sichtbar wurden.

In der folgenden Zusammenstellung sind die für die vier benutzten Lichter gefundenen Energiemengen (pro Sek.) angegeben und zwar einerseits absolut (in Erg.), aufserdem auch, um den hier in erster Linie interessierenden Vergleich zu erleichtern, ihre reziproken Werte (Reizwerte pro Energieeinheit), wobei die für Natriumlicht erhaltenen Werte = 100 gesetzt sind.

Tabelle III.

Lichtart	Feldgröfse 0,987 mm		Feldgröfse 0,75 mm		Feldgröfse 0,618 mm		Feldgröfse 0,375 mm	
	Energie in Erg. 10—10	Reizwerte pro Energieeinheit Na = 100	Energie in Erg. 10—10	Reizwerte pro Energieeinheit Na = 100	Energie in Erg. 10—10	Reizwerte pro Energieeinheit Na = 100	Energie in Erg. 10—10	Reizwerte pro Energieeinheit Na = 100
670 $\mu\mu$	12 850	16	8900	19,3	6754	21,8	3830	20,8
589 „	2 177	100	1720	100	1480	100	795	100
53 „	1 211	180	806	213	671	221	368	216
476 „	1 152	190	898	191	934	159	—	—

Nehmen wir für jedes Licht aus den für die drei Feldgröfsen berechneten Werten das Mittel, so ergibt sich für Li 19,5, für T 207,5, für das grünlich blaue Licht (476 $\mu\mu$) 180.

Man sieht hier, dafs der Reizwert der Energieeinheit, wenn dieser kurze Ausdruck hier gestattet ist, nicht für das Natriumlicht am günstigsten sich darstellt, sondern jedenfalls noch bis ins Grün hinein ein günstigerer ist; da er im grünlichen Blau noch kaum ungünstiger sich darstellt als im Tl-Grün, so wird zu vermuten sein, dafs er seinen Höchstwert irgendwo dazwischen besitzt. Den bekannten Tatsachen in bezug auf die Helligkeitsverteilung widerspricht dies natürlich nicht, da ja die Energiewerte (besonders im Dispersionsspektrum) mit abnehmender Wellenlänge rapide abnehmen.

Von noch gröfserem Interesse ist es, die hier gefundenen Werte unter anderem Gesichtspunkt mit bereits bekannten Tatsachen in Verbindung zu bringen. Hierzu ist die Heranziehung der Energiewerte nicht erforderlich. Vielmehr lassen die eingestellten Spaltweiten ohne weiteres erkennen, in welcher Weise

in dem hier benutzten Spektrum gewisse, hier in Betracht kommende Reizwerte verteilt sind.

Hätte es sich hier (wie bei den Beobachtungen von Eyster) um Reizungen der Stäbchen gehandelt, so hätten die Mengen der verschiedenen Lichter ihren Dämmerungswerten umgekehrt proportional sich herausstellen müssen. Man sieht sogleich, dafs dies nicht der Fall ist. Überall vielmehr finden sich die geringsten Spaltweiten bei dem gelben Natriumlicht. Man kann hierin zunächst eine Gewähr dafür erblicken, dafs in der Tat, wie es verlangt wurde, foveal, nicht aber mit parazentralen Stellen beobachtet worden ist. Unter Berücksichtigung dieses Umstandes könnte man nun zunächst zu erwarten geneigt sein, dafs die Reizwerte der verschiedenen Lichter (wie sie hier bei Schwellenwerten in Betracht kommen) etwa denjenigen Helligkeitswerten proportional sein würden, die sich auf der helladaptierten Peripherie, oder auch denjenigen, die sich auf parazentralen Stellen bei sehr geringer Feldgröfse beobachten lassen (Peripheriewerten oder Minimalfeldhelligkeiten). Es ist indessen zu beachten, dafs, wie zuerst von König angegeben und später mehrfach bestätigt worden ist, bei fovealer Beobachtung homogene Lichter, auch wenn sie an der Grenze der Sichtbarkeit stehen, keineswegs farblos gesehen werden. Vielmehr ist dies nur für einen gewissen Bezirk im Gelb der Fall, während namentlich rote, aber auch blaue Lichter bei stetiger Abschwächung bis zuletzt deutlich farbig gesehen werden. Ist aber dies der Fall, so erscheint es auch denkbar, dafs der farbige Reizerfolg der Lichter für ihre Sichtbarkeit mit in Betracht kommt, und dafs demgemäfs die Sichtbarkeitsverhältnisse nicht durch die Helligkeit bestimmt werden, die den verschiedenen Lichtern bei Fortfall der Farben zukommt. Ob dies in der Tat der Fall ist, konnte nur der Versuch selbst lehren, und es läfst sich in der Tat aus den obigen Beobachtungen entnehmen. Ich habe, um dies zum Ausdruck zu bringen, die den verschiedenen hier benutzten Lichtern im Dispersionsspektrum zukommenden Reizwerte unter den Bedingungen meiner Versuche berechnet und zwar in der Weise, dafs ich den Reizwert des Natriumlichts = 100 gesetzt habe. Ich habe diese Berechnung gesondert ausgeführt für die verschiedenen Feldgröfsen, bei denen mit allen vier Lichtern beobachtet werden konnte. Das Ergebnis dieser Berechnung enthält die folgende Tabelle.

Tabelle IV.

Reizwerte der verschiedenen Lichter (für foveale Schwellen) im Dispersionsspektrum des Hefnerlichts (Na = 100).

Lichtart	Feldgröfse 0,987 mm	Feldgröfse 0,75 mm	Feldgröfse 0,618 mm	Feldgröfse 0,575 mm	Mittel
670 μμ	47,8	54,5	61,8	59	55,8
589 „	100	100	100	100	100
53 „	50,9	60,5	62,5	60,5	59,5
476 „	11,0	12,1	8,6	—	10,6

Vergleicht man nun hiermit die Bestimmungen der Peripheriewerte und Minimalfeldhelligkeiten, so finden wir, dafs v. Kries [1] den Peripheriewert schon für 651 μμ auf 37,5, für 680 μμ auf 9,6, Siebeck [2] die Minimalfeldhelligkeit bei 651 μμ auf 44,9 angibt.[3] Es geht daraus, wie mir scheint, mit grofser Wahrscheinlichkeit hervor, dafs meine Werte (47,8 bei 670 μμ) gegen das langwellige Ende des Spektrums erheblich weniger steil absinken als jene.

Das nämliche ergibt sich aber auch für den Vergleich des Na-Lichts mit kürzerwelligem. Denn während in meinen Versuchen sich für Tl 59,5 und für grünlichblau (476 μμ) noch 10,6 findet, gibt v. Kries für 530 μμ schon 28,5 und für 513 μμ 14,6 an, während Siebeck für 543 μμ 42,8 und für 483,7 nur noch 1,8 ermittelte.

Auch wenn man die Unsicherheit, die allen drei hier verglichenen Gruppen von Beobachtungen ohne Zweifel anhaftet, in angemessene Erwägung zieht, wird man, wie ich glaube, doch sagen dürfen, dafs der Vergleich mit Wahrscheinlichkeit für das oben als möglich erwähnte Verhalten spricht: die foveale Sichtbarkeit der Lichter sinkt, sowohl wenn wir vom Na-Licht zu

[1] *Zeitschr. f. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane* **15**, S. 247.

[2] *Zeitschr. f. Sinnesphysiol.* **41**, S. 89.

[3] Die Vergleichung meiner Werte mit Peripheriewerten oder Minimalfeldhelligkeiten ist durch den Umstand erschwert, dafs meine Versuche mit dem Lichte der Amylacetatlampe ausgeführt sind, während die Bestimmungen von Kries über Peripheriewerte, sowie die von Siebeck über Minimalfeldhelligkeiten sich auf Gaslicht (Triplexbrenner) beziehen. Indessen dürfte der Unterschied der beiden Lichtarten wohl nur ein geringfügiger sein.

röteren, als wenn wir zu kürzerwelligen Lichtern übergehen, weniger stark ab, als ihre bei Fortfall der Farbe zu beobachtenden Helligkeiten, sei es nun, dafs diese als Peripheriewerte (d. h. bei grofser Exzentrizität), sei es, dafs sie als Minimalfeldhelligkeiten (d. h. bei geringer Exzentrizität) beobachtet werden. Und es erscheint hiernach die Vermutung berechtigt, dafs für die foveale Sichtbarkeit auch, wenn ich es kurz so ausdrücken darf, die farbigen Valenzen mit in Betracht kommen. Fallen diese, wie es ohnehin wahrscheinlich ist, gerade im Gelb am wenigsten ins Gewicht, so wird sich daraus eine Begünstigung der Sichtbarkeit für die lebhaften und tiefen Farben schon des Grün, mehr noch des Rot und Blau in ungezwungener Weise verstehen lassen.

Herrn Professor von Kries bin ich für die Anregung zu diesen Versuchen und für vielfache Unterstützung sowohl bei der Ausführung wie bei der Berechnung derselben zu Dank verpflichtet, nicht minder Herrn Dr. Trendelenburg, der mich durch Rat und Hilfe in liebenswürdigster Weise gefördert hat.

(Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.)

Über ein für das physiologische Praktikum geeignetes Verfahren zur Mischung reiner Lichter.

Von
J. von Kries.

Für die Mischung reiner Lichter sind im Laufe der Zeit recht zahlreiche Verfahrungsweisen angegeben worden, die, wiewohl sie sich im Grunde immer einigen wenigen hauptsächlich von Helmholtz und Maxwell eingeführten Prinzipien anschliefsen, doch in der Einzelgestaltung voneinander abweichen. Auch versteht sich, dafs die Vorrichtungen je nach dem besonderen Zwecke dem sie dienen sollen, sehr verschieden gestaltet werden mufsten; für wissenschaftliche, den Farbensinn betreffende Beobachtungen, für Massenuntersuchungen von Personen, die auf Anomalien des Farbensinns zu prüfen sind, endlich für Demonstrationszwecke im Unterricht sind ganz verschiedene Anforderungen zu stellen. Von den zahlreichen beschriebenen Vorrichtungen haben daher die meisten auch den einen oder anderen dieser Zwecke speziell im Auge; andererseits sind auch für die meisten solcher besonderer Verwendungen eine Anzahl gerade für sie geeigneter Einrichtungen zusammengestellt und beschrieben worden. Was insbesondere die dem Unterricht dienenden Einrichtungen anlangt, so kann man sich mit den in allen physiologischen Instituten verfügbaren Hilfsmitteln in recht mannigfaltiger Weise Zusammenstellungen schaffen, die für die Demonstration der wichtigsten Erscheinungen in der Vorlesung ausreichen. Da überdies ein jeder nach Mafsgabe dessen was ihm an optischen Hilfsmitteln zur Verfügung steht, sowie dessen was er zu zeigen wünscht, verschieden zu Werke gehen wird, so möchte ich den Raum dieser Zeitschrift nicht mit einer Beschreibung der Verfahrungsweisen in Anspruch nehmen, zu denen ich nach mancherlei Herumprobieren als den

meinen Wünschen und den Einrichtungen meines Instituts entsprechendsten gekommen bin. Dagegen ist bis jetzt, soweit ich bemerkt habe, niemals etwas über die Behandlung der entsprechenden Aufgaben im physiologischen Praktikum mitgeteilt worden. Vielmehr ist in den bekannten Praktikumsanleitungen (HERRMANN, VERWORN, FUCHS u. a.) die genannte Aufgabe gar nicht berücksichtigt. Dies hat wohl seinen Grund vornehmlich darin, dafs es tatsächlich weit schwieriger ist, den betr. Vorrichtungen eine solche Gestalt zu geben, dafs sie vom Studenten (und zwar, was man doch wünschen mufs, vom Durchschnittsstudenten) hinreichend leicht verstanden und auch technisch behandelt werden können. Namentlich wird ja dabei wünschenswert sein, dafs der Student zur Lösung bestimmter Übungsaufgaben veranlafst werden und somit sein Verständnis an der praktischen Handhabung der Methode bewährt werden kann. Diese Forderung hat sich mir und ähnlich wohl auch vielen Fachkollegen besonders fühlbar gemacht, nachdem durch die neue Prüfungsordnung die Notwendigkeit gegeben war, an Stelle eines mehr demonstrativ behandelten Kurses ein richtiges Praktikum zu setzen, das den Teilnehmern zu selbständigem Arbeiten Gelegenheit gibt. Ich habe sie um so mehr empfunden als (auch hierin wird mir die Mehrzahl der Fachkollegen zustimmen) die Farbenmischungsversuche mit dem Kreisel, obwohl sie als ein Ausgangspunkt recht nützlich sind, doch in verschiedenen Beziehungen sehr zu wünschen übrig lassen.

Es versteht sich, dafs den hier zu stellenden Anforderungen Apparate von verwickelter Konstruktion, selbst wenn sie relativ einfach zu handhaben sind, nur mangelhaft genügen. So habe ich eine Zeitlang eine Anzahl von Einstellungen am HELMHOLTZschen Farbenmischapparat machen lassen, aber dabei wie zu erwarten die Erfahrung gemacht, dafs, wenn auch die verlangten Einstellungen glatt ausgeführt wurden, Einrichtung und Wirkungsweise des Instrumentes und somit auch die Bedeutung der Einstellungen und etwaiger Abweichungen von der Norm trotz vieler auf die Erläuterung verwandter Zeit nur von einem Bruchteil der Beteiligten ganz verstanden wurde. Aus den angegebenen Gründen habe ich schon seit einer Reihe von Jahren dahin gestrebt, ein Verfahren für die Mischung reiner Lichter herzustellen, das für die Benutzung im physiologischen Praktikum geeignet sein sollte; und nachdem es mir gelungen ist, hier zu

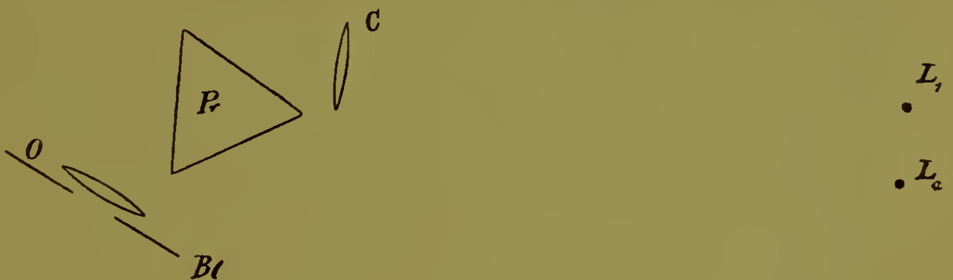
einem, wie ich glaube, recht befriedigenden Ergebnis zu gelangen, möchte ich nicht unterlassen dasselbe den Fachkollegen zur Kenntnis zu bringen.

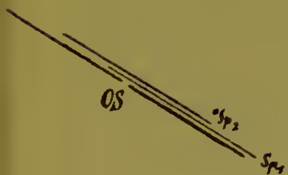
Im Hinblick auf den verfolgten Zweck war zunächst klar, dafs auf eine objektive Darstellung zu verzichten sein würde; denn die hierzu erforderlichen Einrichtungen sind immer recht kompliziert; andererseits ist auch die objektive Darstellung gerade im Praktikum, wo immer nur ein Einzelner oder die wenigen in einer Gruppe zusammen arbeitenden beobachten sollen, durchaus entbehrlich. Für eine Farbenmischungsvorrichtung nach subjektiver (d. h. für die Beobachtung des Einzelnen eingerichteter) Methode bot sich als weitaus einfaches Prinzip dasjenige dar, das v. Frey und ich schon vor Jahren verwendet haben.

Dasselbe geht bekanntlich davon aus, dafs wenn ein reelles Spektrum auf einen Okularspalt geworfen wird, ein hinter den Okularspalt gebrachtes Auge die Fläche der abbildenden Linse mit dem reinen Licht erhellt sieht, das der Okularspalt passieren läfst. Bei Entwerfung von zwei gegeneinander verschobenen Spektren schneidet der Okularspalt aus einem ein, aus dem anderen ein anderes Licht aus, und der Beobachter sieht die genannte Fläche mit einer Mischung der beiden Lichter leuchtend. Um die beiden gegeneinander verschobenen Spektren zu erzeugen, haben wir damals einen vor einer hellen Fläche aufgestellten Schirm mit zwei gegeneinander beweglichen Spalten benutzt. Im Helmholtzschen Apparat wird der gleiche Erfolg bekanntlich erreicht durch die Anwendung eines Spaltes, dessen Licht (in veränderlichem Abstande) einen doppelbrechenden Kalkspat zu durchsetzen hat. Man kann nun zu dem gleichen Resultat auch und zwar in einer weit einfacheren und anschaulicheren Weise gelangen, wenn man zwei gesonderte Lichtquellen anwendet. Will man dies tun, so ist nur zu berücksichtigen, dafs die Lichtquellen hinreichend schmal sein müssen, um die erforderliche Reinheit des Spektrums zu erhalten und dafs sie einander hinreichend genähert werden können, damit man Lichter mischen kann, deren Abstand im Spektrum oder deren Wellenlängenunterschied sich auf hinreichend niedrige Werte bringen läfst. Diese beiden Anforderungen werden nun erfüllbar, wenn man den Kunstgriff anwendet, die Lichtquellen in grofse Abstände vom Spektralapparat zu bringen. Ich habe diesen Abstand zunächst auf 4 m festgelegt. Bei diesem

grofsen Abstande geben nicht nur lineare Glühlampen, sondern auch die im Handel gebräuchlichen röhrenförmigen, deren Breite etwa 2 cm beträgt, eine genügend schmale Lichtquelle, um die Stelle des sonst üblichen Spaltes zu vertreten.[1] Ferner gestatten die gebräuchlichen Fassungen (mit dem normalen Edisongewinde) die beiden Lampen einander auf einen Abstand von 6 cm (von Mitte zu Mitte gerechnet) anzunähern, was (wie sogleich noch genauer zu berühren) mit Rücksicht auf die zu wünschende Verminderung der Wellenlängendifferenz ebenfalls genügt.

Auch lehrt der Versuch (was von vorneherein hätte zweifelhaft erscheinen können), dafs Lampen von mäfsiger Lichtstärke bei dieser Entfernung vollkommen ausreichen, um den zu beobachtenden Feldern eine sogar sehr reichliche Helligkeit zu geben. Die benutzte Einrichtung entspricht also dem nebenstehenden Grundrifs. *Pr* ist das Prisma eines gewöhnlichen Bunsenschen Spektralapparates aus dem der Spaltansatz des Kollimatorrohrs entfernt ist. Die Kollimatorlinse wird durch eine Linse von 0,25 Dioptrien, *C*, ersetzt. An Stelle des Okulars ist ein Rohr mit einem Okularspalt *OS* (gebracht). In einem Abstande von 4 m von der Kollimatorlinse befindet sich eine horizontale Schlittenbahn mit Millimeterskala in der zwei Schieber gleiten. Jeder der Schieber trägt eine der gewöhnlichen Edison-





[1] Lampen mit einfachem linearem Glühfaden wären natürlich noch vorzuziehen; doch sind diese vorläufig wenigstens für die hohe Spannung der hiesigen Zentrale in passenden Abmessungen nicht zu erhalten.

fassungen und ist für die Aufnahme einer der in Handel gebräuchlichen Röhrenlampen L_1 und L_2 eingerichtet. Die Fassungen werden auf den Schiebern derart angebracht, dafs sie eine möglichst weitgehende Annäherung der beiden Lampen gestatten.

Die Objektivlinse *O* entwirft von den beiden Lampen die reellen Spektra Sp_1 und Sp_2 und der Beobachter, dessen Auge sich hinter dem Okularspalt befindet, sieht die Blende *B* mit der Mischung der aus den beiden Spektren ausgeschnittenen Lichter erhellt.

Die hier in Betracht kommende optische Einrichtung besteht also in erster Linie in der wenigstens der überwiegenden Mehrzahl der Studenten bekannten und geläufigen Entwerfung eines reellen Spektrums. Da überdies die hierzu dienende Optik, namentlich wenn man durch Entfernung des Deckels vom Spektralapparat das Prisma sichtbar macht, in allen ihren Teilen vollkommen übersehbar ist, so kann man wohl sagen, dafs die Methode in Bezug auf Einfachheit und Anschaulichkeit den Anforderungen, die man stellen kann, im vollem Mafse entspricht. Die Änderung der Lichtart mit der Verschiebung der Lampen ist, wenn man nur eine derselben brennen und diese in der Schlittenbahn bewegen läfst, gleichfalls so unmittelbar verfolgbar, dafs sie dem Verständnis keine Schwierigkeit bietet. Die Zusammenfügung zweier Lichter endlich ist durch die Benutzung der beiden Lampen in der anschaulichsten Weise gegeben; und man übersieht so auch ohne weiteres, wie die beiden zu mischenden Lichter durch Einstellung der Lampen auf diesen oder jenen Teilstrich der Skala beliebig gewählt werden können.[1]

Für die Ausführung irgendwelcher Beobachtungen ist nun aufser der Wahl der zu mischenden Lichter auch noch eine Veränderung des Mengenverhältnisses, in dem die beiden Lichter gemischt werden, erforderlich. Was diesen Punkt anlangt, so bediene ich mich hier einer besonderen Vorrichtung, die sich als sehr geeignet bewährt hat. Sie beruht auf der Variierung der Brennstärke von Glühlampen durch Vorschaltung von Widerständen. Die allgemein üblichen Rheostaten mit beweglichen Schiebern gestatten bei passendem Betrage des Wider-

[1] Nützlich ist es selbstverständlich, wenn, wie es hier nicht nur mit dieser, sondern mit allen Versuchseinrichtungen geschieht die Studenten gedruckte Anleitungen in die Hand bekommen, in denen eine kurze Beschreibung des Apparates mit schematischer Zeichnung enthalten ist.

standes leicht eine sehr ausgiebige Veränderung der Lichtstärke. Da es in unserem Falle lediglich darauf ankommt, das Verhältnis der beiden gemischten Lichter abzustufen, so wird das Verfahren in angenehmer Weise vereinfacht, indem man die beiden der einen und der anderen Lampe vorgeschalteten Widerstände nebeneinander in entgegengesetzter Anordnung anbringt und ihre Schieber miteinander verkoppelt. Auf diese Weise wird bei einer Mittelstellung des Schiebers jeder Lampe der halbe Widerstand vorgeschaltet, während bei den beiden extremen Stellungen je eine Lampe den vollen und die andere gar keinen Widerstand vorgeschaltet hat. Hierdurch wird erreicht, dafs der Beobachter durch einen Handgriff das Stärkeverhältnis der beiden in die Mischung eingehenden Lichter von einem bis zum entgegengesetzten Extrem verändert.

Läfst man zunächst den Schieber hin und her bewegen und dabei die ja direkt sichtbaren Lampen betrachten, so ist der Wechsel ihrer Lichtstärken ohne weiteres zu verfolgen und es ist daher auch die Veränderung des Mengenverhältnisses der in die Mischung eingehenden Lichter von der höchsten denkbaren Anschaulichkeit.

Es sind schliefslich nur noch einige Einzelpunkte der Einrichtung zu erwähnen. Das den Rheostaten tragende Brett enthält aufser diesen zwei Steckdosen, an die die beiden Lampen mittels langer Schnüre und der üblichen Stecker angeschlossen werden können. Die beiden Steckdosen sind andererseits mit einer zum Anschlufs an die Zentrale bestimmten gegabelten Leitungsschnur in Verbindung gesetzt, so dafs die Einsetzung eines Steckers in eine Steckdose der Zentrale für den Betrieb des ganzen Apparates genügt. Dabei ist dann in jede der beiden Zuleitungen einer der beiden Rheostaten, überdies in jedem auch noch ein Schalter eingefügt. Die Anbringung der beiden Schalter ist insofern von besonderem Wert, als der Beobachter dadurch in die Lage gesetzt ist, nach Belieben jeden Augenblick die eine oder andere Lampe auszulöschen und somit von dem vorher gesehenen Gemisch den einen oder den anderen Bestandteil für sich zu betrachten.

Die Methode gewinnt an Wert, wenn man die Skala, an der die Lampenträger verschoben werden, derart eicht, dafs für jede Stellung die Wellenlänge des ins Auge gelangenden Lichtes direkt abgelesen werden kann. Ich habe mir zu diesem Zwecke einen Blechschirm mit Spalt auf ein Edisongewinde aufsetzen lassen,

von derselben Art wie die Lampen es haben. Dieser kann ohne weiteres in die Fassungen der Schieber eingesetzt werden und ist so eingerichtet, dafs der Spalt an die Stelle kommt, die sonst der Mitte der Lampe entspricht.

In bekannter Weise kann dann eine mit Na-Licht usw. leuchtend gemachte Flamme hinter den Spalt gebracht und diejenige Stelle aufgesucht werden, bei der die betreffenden Lichter in den Okularspalt gelangen. Sehr angenehm ist es, sich eine Messingskala in entsprechender Weise mit den Angaben der Wellenlängen gravieren zu lassen und diese auf die Schlittenbahn aufzuschrauben. Um die Wellenlängen der Lichter direkt ablesen zu können, ist es dann nur nötig, bei der Aufstellung den Spektralapparat in die richtige Lage im Vergleich zu der Schlittenbahn zu bringen, wozu natürlich die Kontrollierung einer Linie genügend ist. Ich lasse also zu diesem Ende einen Schieber auf diejenige Stelle bringen, die mit 589 $\mu\mu$ bezeichnet ist und es wird alsdann dem Spektralapparate diejenige Stellung gegeben, bei der das Gesichtsfeld von dem Na-Licht erleuchtet ist.

Ist dies geschehen, so kann dann ohne weiteres jede gewünschte Wellenlänge eingestellt oder für jede sich im Versuch ergebende Lampenstellung die Wellenlänge abgelesen werden.

In bezug auf die Aufstellung der Apparate sei dann hier kurz nur noch daran erinnert, dafs der Ort der reellen Spektra genau in der Ebene des Okularspalts liegen mufs (andernfalls erscheinen die Felder ungleichmäfsig gefärbt). Man kontrolliert dies wie bekannt, am besten, indem man einen mit Na-Licht erleuchteten Spalt abbildet und den Okularspalt so einstellt, dafs bei Betrachtung mit einer starken Lupe die Ränder des Spaltes und die gelbe Linie gleichzeitig scharf erscheinen. Selbstverständlich wird man diese Einstellung nicht von den Praktikanten ausführen, sondern vom Leiter des Kursus vorher bewirken lassen. Ist diese Einstellung einmal gemacht, so kann man natürlich die richtige Stellung des Okularspalts durch eine Marke bezeichnen und kann dann bei häufigerer Benutzung des Apparates den Okularspalt ohne wiederholte Prüfungen sogleich danach richtig einstellen.

Die Einrichtung ist so, wie ich sie eben beschrieben habe, in einigen Hinsichten im Vergleich zu anderen unvollständig; es ist nicht schwierig, sie in mehreren Punkten noch zu erweitern. Doch glaube ich, dafs es sich mit Rücksicht auf die

im Praktikum zu stellenden Aufgaben (worauf ich unten noeh zurückkomme) nicht empfiehlt, die Dinge komplizierter zu gegestalten. Eher dürfte dies in Frage kommen, wenn sich vorgerücktere Schüler zur Übung etwas eingehender mit dem Gegenstande beschäftigen wollen und die für solche Zwecke bestimmten kostspieligen Apparate (wie der HELMHOLTZsehe Farbenmischapparat) nicht zur Verfügung stehen. Zunächst ist hier zu erwähnen, dafs der Apparat nur ein einfaehes mit dem Liehtgemisch zu erleuchtendes Feld darbietet, nicht aber ein Vergleichsfeld. Er gestattet daher nicht die Einstellung eigentlicher Gleichungen. Ieh halte dies im Hinblick auf den Gebrauch, zu dem die Einrichtung bestimmt ist, für keinen Nachteil. Die Herstellung ganz genauer Gleichungen ist, da es sieh immer um die passende Bestimmung von mindestens zwei Veränderliehen handelt, stets sehwierig, und so wird der Student oft durch den Eindruck, dafs sich eine ganz zutreffende Gleichung doch nicht erzielen, z. B. ein ganz reines Weifs nicht gewinnen läfst, eher verwirrt und in Zweifel gebracht, während die unten zu erwähnenden subjektiven Einstellungen für den Übungszweek vollkommen ausreichen und mit solchen Sehwierigkeiten nicht behaftet sind.

Will man sich ein Vergleiehsfeld herstellen und die Herstellung wirklicher Gleiehungen zur Aufgabe machen, so ist dies leicht zu bewerkstelligen. Es ist zu diesem Zweeke nur nötig, an der Objektivlinse ein schmales Prisma mit horizontaler brechender Kante zu befestigen, das aus dem Gesichtsfeld einen mittleren Streifen ausschneidet. Eine Lichtquelle mufs, um durch diesen Streifen Lieht in den Okularspalt und in das beobachtende Auge gelangen zu lassen, um einen nach dem breehenden Winkel des Prismas sich riehtenden Betrag höher gelegen sein. Um diesen Streifen unabhängig zu erleuehten, ist es daher nur nötig, in passender Höhe über der einen mit zwei Lampen versehenen Sehlittenbahn eine zweite anzubringen, die man nach Belieben auch mit zwei oder auch nur mit einem Lampenträger ausrüsten kann. So ist z. B. die Vergleichung homogener gelber Lichter mit Li-Tl-Gemisehen leieht zu bewerkstelligen.

Der zweite hier zu erwähnende Punkt ist der, dafs die Abstufung der Lichtstärken resp. des Mengenverhältnisses, in dem zwei Bestandteile gemiseht werden, keine zahlenmäfsige Be-

wertung gestattet. Zu einer solchen zu gelangen, würde auch wohl möglich sein, jedoch unter allen Umständen ziemlich verwickelte Hilfseinrichtungen erfordern. Ich habe deswegen für den hier verfolgten Zweck die beschriebene sehr einfache Methode der Abstufung festgehalten. Sie erlaubt natürlich, wenn man den Doppelrheostaten mit einer Skala versehen läfst, an der die Stellung des Schiebers abgelesen wird, bestimmte Einstellungen zu fixieren und die Ergebnisse mehrerer Beobachter zu vergleichen, was im allgemeinen genügen wird.

Es wird endlich auf den ersten Blick vielleicht als ein Mangel erscheinen, dafs bei der weiten Entfernung der Lampen vom Beobachtungsplatze der Beobachter nicht selbst die Lampen bewegen und die damit verknüpfte Farbenveränderung wahrnehmen und verfolgen kann. Natürlich würde es ein leichtes sein, auch die Bewegung der Lichtquellen vom Beobachtungsplatze aus bewirken zu lassen; es wäre nur nötig, die Schieber mit einer Schraubenspindel auszurüsten, deren Drehungen in bekannter Weise zu einer Verschiebung verwendet werden und vom Beobachtungsplatze mittels Schnurlaufs ausgeführt werden könnten. Ich habe indessen davon Abstand genommen, dem Apparat eine Einrichtung dieser Art zu geben, teils um ihm die grofse Einfachheit, die wie ich glaube seinen Hauptvorzug bildet, unverkürzt zu erhalten, teils noch aus einem anderen Grunde. Die Einrichtung des Praktikums ist hier und wohl auch sonst meistens, der Art, dafs zwei oder drei Studenten in eine Gruppe vereinigt, an derselben Aufgabe beschäftigt sind. Bei dieser Einrichtung ist es dann möglich und, wie ich glaube, auch weit besser, dem Beobachter selbst nur e i n e Einstellung, nämlich die oben erwähnte des Doppelrheostaten, zu übertragen. Dagegen wird die Bewegung der Lampen von einem an diesen aufgestellten Gehilfen nach Anweisung des Beobachters bewirkt. Es hat dies nicht nur den Vorteil, dafs noch ein zweiter an den Versuchen tätig teilnimmt, sondern auch den, dafs der Beobachter gezwungen ist, sich über das, was er sieht, klar zu werden und danach seine Anweisungen zu geben.

Da die beschriebene Einrichtung im Hinblick auf bestimmte Arten von Versuchen zusammengestellt ist, so wird es von Nutzen sein, wenn ich über die Art der Beobachtungen, für die sie in erster Linie gedacht und geeignet ist und für die sie hier Verwendung findet, noch einige Bemerkungen hinzufüge. Ich

pflege zunächst um die Verhältnisse der Lichtmischung im allgemeinen, das Gleicherscheinen objektiv ungleicher Lichter und die Abhängigkeit des Aussehens von dem Mengenverhältnis der Bestandteile zu erläutern, Mischungen aus Rot und grünlichem Gelb herstellen zu lassen. Zu diesem Zwecke werden die Lampenträger auf zwei bestimmte Stellen geschoben, und zwar so, das Lichter von 670 und 547 $\mu\mu$ gemischt werden. Und da es ja stets empfehlenswert ist, den Praktikanten eine bestimmte Aufgabe zu stellen, deren Lösung durch ein bestimmtes Resultat gegeben ist, so wird hier eine Einstellung des Rheostatenschiebers verlangt, bei der das Gemisch rein gelb erscheint. Die Änderung des Aussehens der Mischung mit der Verschiebung des Rheostaten, die Betrachtung der beiden zu einem reinen Gelb sich kombinierenden Bestandteile (spektrales Rot und gelbliches Grün), endlich die Vergleichung der von den verschiedenen Beobachtern gemachten Einstellungen machen schon diesen einfachen Versuch zu einem im hohen Grade belehrenden. Die Ausführung einer analogen Beobachtung am brechbareren Spektralhälfte mufs bei der stets beschränkten Zeit im allgemeinen unterbleiben. Dagegen wird dann stets als zweiter Fall der Mischungserscheinung die Kombination eines dem langwelligen und eines dem kurzwelligen Ende des Spektrum nahen Lichtes genommen, die so erhaltenen Purpurtöne und ihre Abstufung nach der einen und anderen Seite beobachtet.

Die dritte und vorzugsweise wichtige Aufgabe bildet dann die Bestimmung eines oder einiger komplementärer Farbenpaare. Zu diesem Zwecke wird stets ein Licht festgelegt, und die Aufgabe besteht nun darin, einerseits durch richtige Stellung der anderen Lampe das zu jenem komplementäre Licht ausfindig zu machen, andererseits dem Rheostatenschieber diejenige Stellung zu geben, bei der das Verhältnis der beiden Lichter das für die Farblosigkeit erforderliche ist. Es ist dabei empfehlenswert, die Einstellung eines solchen Lichtes zur Aufgabe zu machen, bei dessen Variierung die Farbe sich schnell ändert, weil man in diesem Falle sehr präzise Einstellungen erhält, während in anderen Fällen, wenn erst starke Verschiebungen eine merkliche Farbenänderung bewirken, die Resultate naturgemäfs stark schwanken und das Verfahren weniger befriedigend wird.

Im allgemeinen lasse ich zunächst dem rechten Schieber eine bestimmte Stellung geben und hierdurch ein blaues Licht

(460 $\mu\mu$) fixieren. Der Beobachter hat sich nunmehr klar zu machen, daſs wenn er bei Hin- und Herbewegung des Schiebers das Gemisch nicht rein weiſs erhalten kann, sondern es noch grünlich bleibt, der langwellige Mischungsbestandteil noch zu grün ist und mehr gegen Rot hin gebracht werden muſs, also der linke Schieber nach linkswärts, von dem rechten ab, zu bewegen ist; daſs dagegen, wenn das Gemisch statt rein weiſs rosa bleibt, der linke Schieber ein zu rotes Licht liefert und daher gegen Grün hin geschoben werden muſs. Indem nach seiner entsprechend gegebenen Aufforderung der an den Lampen stehende Gehilfe die Stellung vorsichtig ändert, gelingt es ohne Schwierigkeit eine Einstellung zu erhalten, bei der das beobachtete Feld vollkommen rein weiſs erscheint. Als Ergebnis wird die Stellung des bewegten Schiebers und die Rheostateneinstellung abgelesen. — Ebenso kann der Versuch mit Festlegung eines roten Lichtes und Verschiebung der anderen, das komplementäre Blaugrün liefernden Lampe ausgeführt werden.

Ich habe die beschriebene Einrichtung seit geraumer Zeit in Gebrauch und finde, daſs die betreffenden Versuche zu denjenigen gehören, die die Praktikanten am allermeisten interessieren und fesseln, und daſs sie das Verständnis und die Einprägung der doch nicht ganz einfachen Verhältnisse der Lichtmischung in sehr wertvoller Weise erleichtern. Ich glaube daher, daſs das Verfahren den an eine Praktikumsmethode zu stellenden Ansprüchen in der Tat recht gut entspricht.

---

[1] Herr Mechaniker Petzold hat es übernommen, die im obigen beschriebenen Hilfseinrichtungen zum Spektralapparat (Doppelrheostat nebst Schalter und Steckdosen), sowie die Schlittenbahn mit Lampenträgern zu liefern. Der Preis derselben wird sich etwa auf 80—100 Mk. stellen. Dagegen habe ich die Mitlieferung eines besonderen Spektroskops nicht in Aussicht genommen, da ich von der Annahme ausgehe, daſs die Mehrzahl der Fachkollegen vorziehen wird, einen in ihrem Besitze befindlichen Spektralapparat für den Zweck herrichten zu lassen, was, da es sich im wesentlichen nur um die Ersetzung des Okulars durch einen Okularspalt und der starken durch eine schwache Kollimatorlinse handelt, mit den überall verfügbaren Hilfskräften leicht zu bewerkstelligen ist.

Aus dem physiologischen Institut zu Freiburg i. B.

Über das Licht der Nernstlampen und seine Verwendung zu physiologisch-optischen Zwecken.

Von

Raïssa Golant.

In ihrer Arbeit: „Über physiologische Methoden zur Prüfung der Zusammensetzung gemischter Lichter“[1] fand Frl. Böhm, dafs 1. von den drei von ihr in Anwendung gebrachten Prüfungsmethoden die der Rayleigh-Gleichung (Gleichung zwischen einem Gemisch von zwei Lichtern, die von der Wellenlänge des Lithium- und Thalliumlichtes sind, und einem homogenen, das dem Natriumlicht entspricht), die genaueste ist, und dafs 2. von den zwei von ihr untersuchten elektrischen Lampen das Licht der Nernstlampe eine weit geringere qualitative Änderung bei verschiedener Brennstärke erleidet als das der Kohlenfadenlampe. Da Frl. Böhm die Änderung des Energieverhältnisses von Thallium- und Lithiumlicht zugunsten des langwelligeren letzteren bei Spannungsverminderung von 30 Volt nur gleich 10,9 % gefunden hat, so war es wahrscheinlich, dafs die Spannungsänderungen, die in den Zentralen vorkommen, bei den physiologisch-optischen Versuchen, bei denen die qualitative Unveränderlichkeit des Lichtes erforderlich ist, für die Nernstlampe nur wenig in Betracht kommen würden. Um die Nernstlampe mit Sicherheit als geeignet für diese Versuche zu erklären, schien es noch wichtig, die Änderung des Energieverhältnisses zweier extremer Lichter, die für physiologisch-optische Zwecke noch

[1] *Zeitschr. f. Sinnesphysiol.* 42, S. 155.

Anwendung finden — eines blauen und eines roten — bei wechselnder Brennstärke festzustellen.

Auf Veranlassung von Herrn Geheimrat v. KRIES und unter seiner Leitung, für die ich ihm auch an dieser Stelle meinen aufrichtigen Dank aussprechen möchte, habe ich diese Untersuchung unternommen.

Die Beobachtungen wurden am HELMHOLTZschen Farbenmischapparat ausgeführt, an dessen einem Kollimatorrohr durch passende Stellung des Doppelspats und des NICOLschen Prismas eine Purpurmischung (Gemisch von blauem Strontium- und rotem Lithiumlicht) hergestellt war, die unveränderlich blieb und als Vergleichsmischung diente. Es wurde eine ziemlich blaue Purpurmischung gewählt, da es sich gezeigt hat, dafs dieselbe die kleinste mittlere Abweichung der einzelnen Beobachtungen von dem mittleren Wert gibt (die Nicolstellung des Vergleichslichtes war 77^0, während Nicolprisma auf 90^0 gedreht reines Strontiumlicht gab).

Am anderen Kollimatorrohr wurde der Doppelspat so gestellt, dafs die beiden (dem ordentlichen und aufserordentlichen Spektrum zugehörigen und gegeneinander senkrecht polarisierten) Lichter ebenfalls Lithium und Strontium waren. Durch Drehungen am NICOLschen Prisma konnte man das Verhältnis der beiden Lichter ändern und eine der gegebenen Mischung gleiche einstellen.

An dieser Lampe wurde nun die Spannung verändert und zwar (ebenso wie auch Frl. BÖHM zu Werke gegangen war) durch Einstellung eines vorgeschalteten RUHSTRATschen Widerstandes von im ganzen 1000 Ω. Die Spannung wurde an einem ebenfalls RUHSTRATschen Voltmeter abgelesen.[1]

Die Beobachtungen wurden abwechselnd mit voller und ver-

[1] Eine Kontrollierung des benutzten Voltmeters, die Herr Dr. RÜMELIN im hiesigen physikalischen Institut für mich auszuführen die Güte hatte, zeigte, dafs die Angaben des Instrumentes bei den geringen Spannungen etwas zu niedrig, bei den hohen etwas zu hoch waren. Es dürften daher die hier mit 35 Volt bewerteten Spannungsänderungen in Wirklichkeit etwas weniger betragen haben (etwa 33 Volt). Da indessen die Eichung des Instrumentes wenigstens in einem Teil seiner Skala auch auf Schwierigkeiten stiefs und keine grofse Genauigkeit gestattete, so habe ich von einer Umrechnung der Werte auf Grund der Eichung Abstand genommen.

minderter Spannung gemacht, je 10 Beobachtungen für jede Spannung.

Die Helligkeitsunterschiede, die bei der Spannungsänderung von 35 V. sehr bedeutend waren, wurden durch einen Episkotister ausgeglichen. Doch wurde selbstverständlich bei jeder Beobachtung sowohl Nicolstellung als auch die Spaltweite variiert, somit auf vollkommene Übereinstimmung mit dem Vergleichsfeld eingestellt. Die Änderung der Nicolstellung am Kollimatorrohr der Versuchslampe, die bei Spannungsänderung herbeigeführt werden mufs, um die erforderliche Purpurmischung darzustellen, zeigt die Änderung des Energieverhältnisses des Strontium- und Lithiumlichtes an. Dasselbe will ich zur Abkürzung im weiteren als $\frac{\mathrm{Sr}}{\mathrm{Li}}$ bezeichnen.

Eine sehr lästige Erschwerung meiner Versuche war durch die unregelmäfsigen Wechsel in der Spannung der Zentrale gegeben, die (wie unten noch genauer zu berühren) von ziemlich erheblichem Betrage waren. Einerseits mufsten diese eine gewisse Variabilität auch in das Aussehen des Vergleichsfeldes (das eigentlich hätte konstant bleiben sollen) hineinbringen. Indessen wird man annehmen dürfen, dafs die hiermit gegebenen Fehler, da die Versuche in beständiger Abwechslung mit der hohen und niedrigen Spannung der zu beobachtenden Lampe ausgeführt wurden, und bei der Häufung zahlreicher Versuche, sich allmählich ausgeglichen und eliminiert haben werden.

Aufserdem aber brachte der gleiche Umstand es auch mit sich, dafs die zu variierenden Spannungen nicht mit Genauigkeit auf zwei bestimmte Werte festgelegt werden konnten. Allerdings konnte ich vor jeder Einstellung die Spannung regulieren; aber schon während der für die Einstellung erforderlichen Zeit änderte sich oft die Spannung merklich. Es erschien daher am korrektesten unmittelbar nach einer jeden Einstellung das Voltmeter abzulesen (was in wenigen Sekunden geschehen konnte) und den so erhaltenen Wert als den mafsgebenden zu betrachten. Um die Rechnung nicht gar zu sehr zu komplizieren, habe ich die so bestimmten hohen und niedrigen Spannungen für jede Reihe in einen Mittelwert zusammengezogen. Aber es lag nun in der Natur des Verfahrens, dafs obwohl ich gewünscht hatte, immer Veränderungen von um 35 Volt (von 225 auf 190 Volt) auszuführen, dies tatsächlich nicht streng erreicht werden konnte.

Um die zahlenmäfsigen Ergebnisse trotz dieses Umstandes möglichst vergleichbar zu machen, habe ich in den folgenden Tabellen die gefundene Änderung überall auf 35 Volt Spannungsänderung berechnet, unter der Annahme eines proportionalen Zusammenhanges, die, da die wirklichen Änderungen dem Betrage von 35 Volt doch immer ziemlich nahe lagen, als zulässig gelten darf.

Ich habe in dieser Weise 7 Lampen untersucht und dabei die folgenden Resultate erhalten. (Jede Zahl ist aus dem Mittelwert von 10 Beobachtungen gewonnen worden.)

	Verhältnis des $\frac{Sr}{Li}$ bei 225 V. zu demjenigen bei 190 V.	Verhältnis der mittleren Abweichung der abgelesenen Nicolstellung zur Änderung
Lampe I (nicht neu)	1,283	0,14
Lampe II (neu)	1,259	0,15
Dieselbe nach 44 Brennstunden	1,292	0,16
Lampe III (neu)	1,337	0,10
Lampe IV (neu)	1,201	0,29
Dieselbe nach 148 Brennstunden	1,212	0,18
Lampe V	1,312	0,15
Lampe VI	1,220	0,11

Die Tabelle lehrt, dafs die durch Veränderung der Brennstärke von 225 auf 190 Volt der Quotient Sr/Li sich etwa im Verhältnis von 1,2 bis 1,3 zu 1 ändert. Da ich den Eindruck gewann, als ob die Anderungen bei neuen Lampen geringer wären als bei solchen, die bereits länger gebrannt haben, so habe ich noch eine weitere Lampe in der Weise systematisch durchgeprüft, dafs ich sie zuerst neu untersuchte, dann dauernd brennen liefs und in passenden Zwischenräumen immer wieder prüfte. Dieser Versuch, dessen Ergebnis die folgende Tabelle enthält, zeigt, dafs in der Tat die Abhängigkeit der Lichtzusammensetzung von der Brennstärke bei der neuen Lampe geringer ist und mit zunehmender Abnutzung allmählich stärker wird.

Beobachtungs-reihe	Zahl der Stunden, die die Lampe gebrannt hat	Verhältnis des $\frac{Sr}{Li}$ bei 225 V. zu demjenigen bei 190 V.	Verhältnis der mittleren Abweichung der abgelesenen Nicolstellung zur Änderung
I	0	1,227	0,19
II	17	1,200	0,19
III	62	1,220	0,18
IV	113	1,207	0,09
V	136	1,256	0,18
VI	156	1,252	0,19
VII	223	1,279	0,27
VIII	273	1,306	0,19
IX	391	1,286	0,21
X	472	1,453	0,24
XI	760	1,405	0,20

In den obigen Tabellen ist nur die Änderung des zwischen Li- und Sr-Licht bestehenden Verhältnisses berücksichtigt worden, die ja für die hier verfolgten Zwecke vorzugsweise von Bedeutung ist. Da es unter Umständen auch von Interesse sein kann, darüber unterrichtet zu sein, wie stark sich die Intensität jedes einzelnen Lichtes mit abnehmender Brennstärke ändert, so habe ich dies für eine Anzahl von Fällen auch berechnet. Es ergab sich dabei, dafs durch die Verminderung der Spannung von 225 auf 190 Volt die Intensität des Lithiumlichtes bei den einzelnen Lampen ziemlich ungleich abgeschwächt wurde. Die Ergebnisse zeigt die folgende Zusammenstellung, die sich gleichfalls auf die Spannungen von 225 und 190 Volt bezieht.

Lampe	Schwächung des Li-Lichtes	Schwächung des Sr-Lichtes	Änderung des Quotienten Sr/Li
I	0,337	0,256	1,32
II	0,377	0,276	1,36
VII (neu)	0,464	0,371	1,25
VII (gebraucht)	0,241	0,166	1,44

Für die Benutzung der Nernstlampen zu physiologisch-optischen Zwecken würde es ja nun weiter darauf ankommen, wie grofs die unregelmäfsigen und im allgemeinen unkontrollierten Schwankungen der Spannung in den städtischen Zentralen sind,

und es läfst sich wohl vermuten, dafs in dieser Hinsicht die Verhältnisse an verschiedenen Orten stark ungleich sein werden. Was die Freiburger Zentrale anlangt, auf die allein meine Erfahrungen sich erstrecken, so fand ich die Schwankungen beträchtlicher, als ich erwartet hatte. In der Regel bewegte sich die Spannung zwischen 222 und 228 Volt; ich habe aber (als äufserstes) Spannungen von 216 und von 235 Volt beobachtet; und die Änderungen sind oft auch in kurzer Zeit sehr beträchtliche, so dafs ich z. B. im Laufe einer Versuchsreihe von 1 bis 1,5 Stunde Unterschiede bis zu 13 Volt gehabt habe. Bei einem derartigen Funktionieren der Zentrale wird man nach den obigen Beobachtungen doch mit Schwankungen des Li/Sr- Verhältnisses bis 10 % rechnen müssen, eine Ungenauigkeit, die für die physiologischen Zwecke doch schon sehr störend genannt werden darf.

Günstiger werden natürlich die Dinge liegen, wenn man in der Lage ist, die Brennstärke der Lampen beständig an einem Voltmeter kontrollieren und durch einen vorgeschalteten Widerstand auf eine bestimmte Spannung regulieren zu lassen, oder noch besser, wenn man über eigene konstante Stromquellen, etwa eine grofse Akkumulatorenbatterie verfügt. Kann man die auf wechselnder Brennstärke beruhenden Schwankungen auf solche Weise annähernd ausschliefsen, so erhebt sich dafür eine andere Frage, deren experimentelle Beantwortung erheblich schwieriger ist, die nämlich, wie weit (bei gegebener Brennstärke) die einzelnen Exemplare der Nernstlampe konstantes Licht liefern, oder in bezug auf ihre Lichtzusammensetzung sich unterscheiden. Es versteht sich, dafs die Prüfung einer mäfsigen Zahl von Lampen uns in dieser Richtung nur ein ziemlich unsicheres, stark vom Zufall abhängiges Ergebnis liefern kann. Ich fand bei der Vergleichung von vier Lampen, die sukzessive an derselben Vergleichslampe geprüft wurden, Verhältnisse der Li/Sr-Verhältnisse, die sich, den niedrigsten = 1 gesetzt auf

1,0
1,208
1,463
1,619 berechneten.

Hieraus geht hervor, dafs auch die Lichtzusammensetzung verschiedener Lampen unter gleichen Bedingungen des Brennens

eine recht erheblich ungleiche sein kann; und hierin liegt für den physiologischen Versuch eine Fehlerquelle, vor der man sich nicht in so einfacher Weise wie vor der Spannungsänderung schützen kann, zu deren Beseitigung man vielmehr auf eine direkte Lichtprüfung etwa in der Art der von Frl. Böhm beschriebenen Methoden würde greifen müssen. Im ganzen wird also zu konstatieren sein, dafs die Nernstlampen neben den grofsen Vorzügen, die sie insbesondere vor den Kohlenfadenlampen besitzen (relativ geringere Abhängigkeit der Lichtart von der Brennstärke, gröfserer Reichtum des Lichtes an blauen Strahlen), doch das für physiologische Zwecke zu wünschende Ideal einer Lichtquelle nicht erreichen und demgemäfs nur mit einer ihrer Variabilität Rechnung tragenden Vorsicht benutzt werden können.

Druck von Lippert & Co. (G. Pätz'sche Buchdr.), Naumburg a. S.